

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA NASCIMENTO DE VASCONCELLOS SCHIAVO

**MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR
EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA
MONTANA NO ESTADO DO PARANÁ**

CURITIBA

2016

BRUNA NASCIMENTO DE VASCONCELLOS SCHIAVO

**MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA
FOLIAR EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA
MISTA MONTANA NO ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, Área de concentração em Manejo Florestal.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Paula Dalla Corte

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

CURITIBA

2016

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Schiavo, Bruna Nascimento de Vasconcellos

Métodos para estimativa do índice de área foliar em um fragmento de floresta ombrófila mista montana no estado do Paraná / Bruna Nascimento de Vasconcellos Schiavo. – Curitiba, 2016.

122 f. : il.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Ana Paula Dalla Corte

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 19/02/2016.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Produtividade florestal. 2. Florestas - Paraná. 3. Manejo florestal. 4. Sensoriamento remoto. 5. Teses. I. Dalla Corte, Ana Paula. II. Sanquetta, Carlos Roberto. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.53

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **BRUNA NASCIMENTO DE VASCONCELLOS SCHIAVO**, intitulada: "**MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA NO ESTADO DO PARANÁ**", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação.

Curitiba, 19 de Fevereiro de 2016.



Prof ANA PAULA DALLA CORTE (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof NELSON CARLOS ROSOT (UFPR)



Prof PYRAMON ACCIOLY (PUC/PR)



Aos meus amados avós

Lila e Luiz Hevando,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos realizadas na minha vida, e principalmente pela oportunidade de continuar neste plano espiritual.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realização do curso.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Ana Paula Dalla Corte, que foi fundamental na realização deste trabalho, mas principalmente, por ser uma pessoa sensacional, a qual me transmitiu vários ensinamentos que vão muito além da vida acadêmica, ensinamentos estes que levarei para a vida. Muito obrigada pelos conselhos, amizade e confiança em mim depositados!

Ao meu coorientador Prof. Carlos Roberto Sanquetta, pela disponibilidade, ensinamentos e valiosas contribuições neste trabalho.

Aos professores da pós-graduação por todo conhecimento transmitido, em especial aos professores: Sylvio Péllico Netto, Sebastião Machado e Henrique Soares Koehler, que além de grandes mestres foram exemplos de solidariedade e compreensão. Muito obrigada por todo apoio e confiança durante o período em que os problemas de saúde me abatiam! Minha eterna gratidão!

Aos meus avós Lila e Luiz, meus maiores exemplos de vida, por todo o amor e confiança que sempre depositaram em mim.

Aos meus pais Mariza e Amilton, por todo o carinho e orientação.

Ao meu marido Tiago, por todo apoio, incentivo e companheirismo.

À minha querida tia Magda e primo Thales, pela amizade, por toda força e cuidados a mim dedicados.

A minha amiga Lueni pela amizade, que mesmo longe sempre esteve muito presente.

Aos colegas de pós-graduação: Ângela, Aurélio, Ana Beatriz, Alexandre, Camila, Jean, Mônica, Manoela, Marieli, Lara, Greyce, Tauane, Vinícius e aos demais amigos do BIOFIX.

Aos amigos de longa data, que longe ou perto são essenciais na minha vida.

Ao CNPQ pelo auxílio financeiro.

Ao PELD sítio 9 pela disponibilidade de dados.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos que me deram forças para não desistir diante dos problemas de saúde enfrentados, por todas as orações e solidariedade. Se hoje este trabalho é uma realidade, é porque diante das adversidades, tive ao meu lado pessoas especiais. A vocês, minha eterna gratidão!

*“ Mesmo quando tudo parece
desabar, cabe a mim decidir, entre rir
ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar;
porque descobri, no caminho incerto
da vida que o mais importante é o
decidir ”*

Cora Coralina

RESUMO

O Índice de Área Foliar (IAF) é considerado como parte da estrutura mais sensível da floresta, pois as folhas do dossel regulam alguns processos fundamentais da produtividade florestal. A modelagem do IAF é considerada crítica e pouco acurada, principalmente no que se refere a florestas nativas. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo testar diferentes métodos para estimativa do IAF por meio de detecção remota, em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, em São João do Triunfo, no Estado do Paraná. A área de estudo possui 4 parcelas permanentes, de modo que, foram distribuídas 81 unidades amostrais por parcela e 33 abrangendo a área total. A estimativa do IAF pelo método terrestre foi gerada automaticamente pelo sensor óptico CI-110, considerada como verdade de campo. O IAF estimado pelo método orbital foi gerado a partir de imagens do sensor Pléiades, baseado na relação empírica entre os índices de vegetação. Para o IAF obtido pelo método orbital foram testados os modelos propostos por SEBAL (2002) e Duchemin et al. (2006), e foram analisados os índices de vegetação NDVI, SR, SAVI e EVI. O IAF obtido a campo apresentou uma grande variabilidade, com valores entre 6,01 e 8,01, fator que está relacionado ao grande número de espécies existentes no local. Os índices de vegetação NDVI e SR não foram capazes de apresentar a variabilidade das espécies florestais para a estimativa do IAF, e os índices SAVI e EVI foram os que geraram melhores resultados, possibilitando a estimativa do IAF. O EVI apresentou correlação linear com o IAF obtido a campo variando de 0,54 a 0,77, e o SAVI entre 0,55 e 0,78. O valor médio do IAF gerado pelo modelo de Duchemin et al. (2006) foi bastante homogêneo, onde as parcelas variaram de 4,11 a 4,34, porém, não obteve correlação linear com os dados obtidos a campo. O modelo proposto por SEBAL (2002) apresenta uma maior variação entre as parcelas, exibindo valores entre 2,65 a 3,14, com r variando de 0,60 a 0,72, tendo forte correlação com os dados de IAF obtidos a campo. Logo, foram gerados modelos de regressão para estimativa do IAF baseados nos índices de vegetação SAVI e EVI, de modo que, todas as equações ajustadas foram consideradas satisfatórias, com R^2 maior do que 0,6 e $Syx(\%)$ de 4%. Os modelos gerados apresentaram resultados satisfatórios, o que demonstra a aplicabilidade desta metodologia.

Palavras-chave: Floresta com Araucária; Fotografias Hemisféricas; Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The Leaf Area Index (LAI) is considered as part of the most sensitive structure of the forest, because the leaves of the canopy regulate some fundamental processes of the forest productivity. The modeling of LAI is considered critical and little accurate, mainly with regard to native forests. Therefore, the present study aimed to test different methods for estimate of LAI by means of remote sensing, in a Subtropical Ombrophilous Forest fragment, in São João do Triunfo, in Paraná state. The area of study has 4 permanent plots, so, 81 sampling units were distributed by plots and 33 covering the total area. The estimate of LAI by terrestrial method was generated automatically by the optical sensor CI-110, considered as truth field. The LAI estimated by orbital method was generated from images of Pléiades sensor, based on the empirical relation among the vegetation indexes. For the LAI obtained by orbital method it was tested the models proposed by SEBAL (2002) and Duchemin et al. (2006), and it was analyzed the indexes of vegetation NDVI, SR, SAVI and EVI. The LAI obtained by field presented a great variability, with values between 6.01 and 8.01, factor that is towed to the great number of existing species in the local. The indexes of vegetation NDVI and SR were not capable of presenting the variability of the forest species for estimate of LAI, and the indexes SAVI and EVI were the ones that generated better results, allowing the estimate of LAI. The EVI presented linear correlation with the LAI obtained by field varying from 0.54 to 0.77, and the SAVI between 0.55 and 0.78. The average value of LAI generated by the model of Duchemin et al. (2006) was fairly homogeneous, where the plots vary from 4.11 to 4.34; however, it was not obtained linear correlation with the data obtained by field. The model proposed by SEBAL (2002) presents a greater variation between the plots, displaying values between 2.65 and 3.14, with r varying from 0.60 to 0.72, and it has strong correlation with the LAI data obtained by field. Thus, it was generated models of regression for estimate of LAI based on the indexes of vegetation SAVI and EVI, in such a way that all the adjusted equations were considered satisfying, with R^2 greater than 0.6 and Syx of 4%. The generated models presented satisfying results, which demonstrates the applicability of this methodology.

Keywords: Araucaria forest; Hemispherical Photographs; Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CARACTERÍSTICAS DA PROJEÇÃO DO HEMISFÉRIO SOBRE UM PLANO	22
FIGURA 2 – REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE UMA FOLHA VERDE SADIA, PARA INTERVALO DE COMPRIMENTO DE ONDA DE 0,4 E 2,6 μ m.	26
FIGURA 3 – IMAGENS DE SATÉLITES DE DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS DE UMA PORÇÃO DO LAGO PARANOÁ – BRASÍLIA - DF.	32
FIGURA 4 – CURVA ESPECTRAL DE CADA BANDA DO SENSOR PLÉIADES.	34
FIGURA 5 – INTENSIDADE DO FLUXO RADIANTE EMITIDO PELO SOL.....	37
FIGURA 6 – EXEMPLOS DE IMAGENS COM DIFERENTES NÍVEIS DE RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA.	39
FIGURA 7 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ.....	43
FIGURA 8 – MAPA TEMÁTICO DA DIVISÃO FITOGEOGRÁFICA DO ESTADO DO PARANÁ.....	45
FIGURA 9 – MEDIÇÕES SENDO ADQUIRIDAS E INTERFACE GRÁFICA DO CI-110.....	47
FIGURA 10 – DIVISÕES DE ZÊNITE E AZIMUTE.....	48
FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DE ORGANIZAÇÃO DA COLETA DE DADOS	51
FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS IMAGEADOS NA ÁREA DE ESTUDO	52
FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA COLETA DE DADOS EM CAMPO	53
FIGURA 14 – ETAPAS DA COLETA DE DADOS A CAMPO (LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS, POSICIONAMENTO DO CI-110 E CAPTURA DA FOTOGRAFIA HEMISFÉRICA, DEMARCAÇÃO DO PONTO COM FITA ZEBRADA).....	53
FIGURA 15 – TÉCNICA DA FOTOGRAFIA HEMISFÉRICA DE DOSSEL EM CAMPO.	54
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DE UMA FOTOGRAFIA HEMISFÉRICA DA ÁREA TOTAL, APRESENTANDO AS DIVERSAS FORMAS DE COMPOSIÇÃO	65
FIGURA 17 – HISTOGRAMA NOS CANAIS RGB DE FOTOGRAFIA HEMISFÉRICA REFERENTE À ÁREA TOTAL NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ	66
FIGURA 18 – FOTOGRAFIAS HEMISFÉRICAS DA ÁREA DE ESTUDO	69
FIGURA 19 – HISTOGRAMA DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO GERADOS PELA IMAGEM PLÉIADES, PARA TODA A ÁREA DE ESTUDO	77
FIGURA 20 – MAPA TEMÁTICO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI GERADO A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES, PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ.....	79

FIGURA 21 – MAPA TEMÁTICO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO SR GERADO A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES, PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ	82
FIGURA 22 – MAPA TEMÁTICO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO EVI GERADO A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ	84
FIGURA 23 – MAPA TEMÁTICO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO SAVI GERADO A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ	86
FIGURA 24 – ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR GERADO PELOS MODELOS DUCHEMIN et al. (2006) E SEBAL (2002)	89
FIGURA 25 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS PERMANENTES EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES DOSSÊIS FLORESTAIS PREDOMINANTES ..	91
FIGURA 26 – DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE IAF OBTIDO A CAMPO E DE MODELOS AJUSTADOS BASEADOS EM ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	96
FIGURA 27 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS DOS MODELOS TESTADOS	98

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DO SENSOR PLÉIADES 1B.....	34
TABELA 2 – MODELOS DE REGRESSÃO DE AVALIAÇÃO DO IAF TESTADOS	63
TABELA 3 – ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR TERRESTRE ENCONTRADOS NA ÁREA DE ESTUDO.....	70
TABELA 4 - ESTRUTURA HORIZONTAL DE UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ NO ANO 2011	72
TABELA 5 – (CONTINUAÇÃO) ESTRUTURA HORIZONTAL DE UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ NO ANO 201	73
TABELA 6 – INTERVALOS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO GERADOS A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES	75
TABELA 7 – IAF GERADO PELOS MODELOS DUCHEMIN et al. (2006) E SEBAL (2002)	88
TABELA 8 – ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR DO IAF CI-110 COM OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E IAF ORBITAL	93
TABELA 9 – EQUAÇÕES AJUSTADAS, COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS PARA A ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR A PARTIR DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO SAVI E EVI.....	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 HIPÓTESES	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo geral.....	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)	18
2.1.1 Métodos diretos para a determinação do Índice de Área Foliar.....	19
2.1.2 Métodos indiretos para a estimativa do Índice de Área Foliar	20
2.1.2.1 Uso de fotografias hemisféricas.....	21
2.1.2.2 Estudos e aplicações do equipamento imageador CI-110 <i>Plant Canopy Analyzer</i>	22
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO	23
2.2.1 Propriedades ópticas da folha	25
2.2.2 Comportamento espectral da vegetação	27
2.2.3 Interação da radiação solar com o dossel da vegetação	28
2.2.4 Índices de vegetação	29
2.2.5 Sensores ópticos de alta resolução espacial	31
2.2.5.1 Pléiades	33
2.2.6 Processamento digital de imagens	35
2.2.6.1 Correção atmosférica	37
2.2.6.2 Correção radiométrica	39
2.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)	41
2.4 FLORESTA OMBRÓFILA MISTA (FOM)	42
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	43
3.1.1 Clima.....	44
3.1.2 Vegetação.....	44
3.1.3 Solo.....	46
3.2 MATERIAL UTILIZADO	46
3.2.1 Base cartográfica	46
3.2.2. Equipamentos e aplicativos para processamento dos dados	46
3.2.2.1 Caracterização do CI-110 <i>Plant Canopy Analyzer</i>	47

3.3 COLETA DE DADOS	50
3.3.1. Organização dos pontos a serem coletados em ambiente SIG	51
3.3.2 Coleta de dados em campo	52
3.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DA IMAGEM DE SATÉLITE	55
3.4.1 Correção atmosférica.....	55
3.4.2 Correção radiométrica	56
3.5 GERAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	57
3.5.1 Índice de Vegetação de Razão Simples de Bandas (<i>Simple Ratio – SR</i>).....	57
3.5.2 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index - NDVI</i>).....	58
3.5.3 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (<i>Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI</i>)	58
3.5.4 Índice de Vegetação Melhorado (<i>Enhanced Vegetation Index – EVI</i>)	59
3.6 GERAÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES	60
3.7 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE O IAF _{CI-110} E O IAF _{PLÉIADES}	61
3.8 GERAÇÃO DE MODELOS DE REGRESSÃO DE AVALIAÇÃO DO IAF	62
3.8.1 Análise dos condicionantes de regressão	62
3.8.2 Modelos de regressão testados	63
3.8.3. Critérios de seleção para os melhores modelos de regressão testados	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
4.1 ESTIMATIVA DO IAF PELO MÉTODO DE IMAGEAMENTO TERRESTRE	65
4.2 ESTIMATIVA DO IAF PELO MÉTODO DE IMAGEAMENTO ORBITAL	75
4.2.1 Índices de vegetação	75
4.2.1.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)	78
4.2.1.2 Razão Simples (RS)	81
4.2.1.3 Índice de Vegetação Melhorado (EVI)	83
4.2.1.4 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI).....	85
4.2.2 Índice de Área Foliar (IAF)	87
4.3 CORRELAÇÃO PARA A VARIÁVEL IAF PELOS MÉTODOS TERRESTRE E ORBITAL.....	92

4.4 GERAÇÃO DE MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO IAF	95
5 CONCLUSÕES	99
6 RECOMENDAÇÃO	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da estrutura do dossel florestal é essencial para melhorar a compreensão da estrutura da floresta, tanto para fins ecológicos, distinção de habitats, bem como, para analisar as variáveis funcionais (KORHONEN et al., 2006). O Índice de Área Foliar (IAF) é importante para a estimativa dos fluxos de água, carbono e energia e, portanto, é um dos parâmetros biofísicos mais importantes do dossel, por caracterizar a arquitetura e estar relacionado com a biomassa vegetal. Além disso, é necessário para estudos fisiológicos e ecológicos, sendo um indicador da vitalidade das árvores e refletindo nas taxas de assimilação e transpiração das copas, bem como, nas trocas gasosas, balanço hídrico, entre outros (GALVANI, 2010).

A modelagem do IAF em florestas é considerada crítica e pouco acurada, de modo que, é preciso estabelecer estimativas em escala regional para esses estudos. Métodos de estimativa do IAF baseados na detecção remota têm recebido destaque e estão sendo amplamente utilizados. Existem dois principais métodos de estimativa do IAF a partir da detecção remota, sendo: através da relação empírica entre os índices de vegetação gerados por imagens orbitais e o outro baseado em modelos de transferência de radiação, como os sensores ópticos (MA et al., 2014).

Os dados de sensoriamento remoto têm desempenhado um papel importante no monitoramento de áreas florestais, pois possibilitam o mapeamento de grandes áreas (DEVRIES et al., 2015). Além disso, as técnicas de sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) apresentam diversas vantagens em relação a outras técnicas tradicionais de trabalho de campo, pois possibilitam a aquisição de informações em locais de difícil acesso, uso de diferentes escalas, informações homogêneas em escala temporal e informações de baixo custo (CASTILLO et al., 2015).

Atualmente os dados de sensoriamento remoto estão sendo revolucionados a partir de uma nova era de alta observação da Terra, devido aos avanços na resolução espacial que ocasiona a melhoria nas dimensões dos pixels, bem como, nas resoluções temporais e espectrais, que tem tornado o processamento de dados extremamente desafiador (MA et al., 2015). No

entanto, no Brasil, ainda são poucos os estudos de estimativa do IAF que fazem uso potencial de imagens de satélite de alta resolução, como as imagens do sensor Pléiades.

Outra abordagem possível para entender a estrutura florestal são as fotografias hemisféricas do dossel, que são consideradas como técnica de detecção remota de curto alcance. As fotografias hemisféricas caracterizam o dossel florestal a partir da radiação solar interceptada pela vegetação, através de uma lente olho-de-peixe (GONSAMO et al., 2011).

O monitoramento e a mensuração do IAF são desafiadores, pois apresentam uma grande variabilidade espacial e temporal, em função do desenvolvimento e crescimento da vegetação observada. Logo, cada método proposto possui suas dificuldades e vantagens. Por essa razão torna-se de grande importância analisar a inter-relação entre os produtos oriundos de imagens de satélite de altíssima resolução com dados com instrumentos ópticos, visando contribuir para uma melhor caracterização da floresta (SANCHES et al., 2008; MANNSCHATZ et al., 2014).

1.1 HIPÓTESES

Este trabalho teve como bases as hipóteses que se seguem:

- É possível correlacionar o índice de área foliar estimado através de um sensor terrestre com o estimado a partir de dados orbitais de alta resolução espacial.
- É possível gerar modelos de regressão para estimativa do índice de área foliar a partir de índices de vegetação gerados por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Testar diferentes métodos para estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) por meio de sensores orbital e terrestre, em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana, no Estado do Paraná.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar o Índice de Área Foliar (IAF) a partir de fotografias hemisféricas (enfoque terrestre).

- Descrever as características espectrais do Sensor Pléiades (bandas individuais e índices de vegetação) para a determinação indireta do Índice de Área Foliar (enfoque orbital).

- Estimar o Índice de Área Foliar via modelagem, a partir de imagens de satélite de alta resolução espacial com os melhores resultados das combinações testadas.

- Testar as correlações entre os modelos de estimativa do Índice de Área Foliar e selecionar os melhores métodos.

- Gerar modelos de regressão para estimativa do Índice de Área Foliar em Floresta Ombrófila Mista Montana.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)

O Índice de Área Foliar (IAF) foi caracterizado por Watson (1947) como sendo a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo (m^2/m^2).

Woodgate et al. (2015) considera que o IAF é um descritor primário da estrutura da vegetação e é uma variável climática essencial. É considerado como parte da estrutura mais sensível da floresta, pois as folhas do dossel regulam alguns processos ecofisiológicos, como a fotossíntese e a transpiração, que são consideradas como elementos fundamentais da produtividade da floresta (LARCHER, 2004; BAMBI, 2007).

Breda (2003) considera que mudanças como geadas, tempestades, desfolhas, seca, práticas de manejo influenciam diretamente na produtividade da espécie, alterando o IAF. Além disso, estresse hídrico, deficiência nutricional e doenças podem influenciar diretamente na redução da produção de biomassa.

O índice de área foliar depende da composição de espécies, do estado de desenvolvimento, sazonalidade, e principalmente das condições locais e das práticas de manejo, de modo que a soma desses fatores juntamente com os métodos de avaliação está associada a grande variação dos índices de área foliar (QUEIRÓS, 2013).

Brown e Blaser (1968) consideram que o IAF aumenta de acordo com a idade da planta, que então se capacita a interceptar, progressivamente, maior proporção de luz solar incidente. Assim, a partir da formação das folhas, o IAF aumenta até que se atinja um valor crítico em que 95% da luz incidente seja interceptada pelas folhas. Logo, com o aumento do IAF, as folhas inferiores são progressivamente sombreadas, tornando-se menos eficientes no processo fotossintético da comunidade vegetal.

2.1.1 Métodos diretos para a determinação do Índice de Área Foliar

A determinação do IAF através dos métodos diretos não são facilmente utilizados, pois necessitam de um trabalho dispendioso e da destruição de uma grande quantidade de vegetação, principalmente com experimentos em culturas florestais (GRECCO et al., 2011).

Os métodos diretos de estimativa do IAF são baseados na medição da área foliar. Na maior parte das análises são considerados mais precisos, uma vez que evitam problemas associados com aglomeração de folhagem e distribuição do ângulo da folha, porém, são muito mais trabalhosos e em alguns casos se tornam inviáveis (JONCKHEERE et al., 2004).

Nos métodos diretos são feitas medições de áreas, ângulos, forma ou posição, e são efetuadas manual e diretamente sobre os elementos da planta (folhas, troncos, ramos, flores e frutos), logo são determinados os parâmetros caracterizadores da estrutura do copado. Essas medições implicam em alterações, e até mesmo destruição da própria estrutura da copa da planta, sendo, por isso, considerado método destrutivo (QUEIRÓS, 2013).

Os métodos diretos ou destrutivos, são importantes para se ter uma medida real do dossel foliar a partir de uma amostragem representativa em função do tamanho e tipo de planta. Alguns autores consideram esse método como padrão, porém sua execução é pouco viável quando se deseja realizar uma grande amostragem em culturas florestais (PAIVA, 2009).

Zanchi et al. (2009) considera que a medição do IAF por meio do método direto não é fácil de ser obtido, pois se caracteriza pela destruição da vegetação a ser analisada, no entanto é um dos processos mais confiáveis, por utilizar cálculos diretos sobre a quantidade de massa do vegetal analisado, não dependendo assim de radiação como recurso de análise e muito menos a influência das hastes no cálculo do IAF.

2.1.2 Métodos indiretos para a estimativa do Índice de Área Foliar

Existem muitos métodos viáveis e equipamentos para a estimativa não destrutiva do índice de área foliar e radiação fotossinteticamente ativa, de modo que pode ser considerado a árvore isolada, plantios, medidas biométricas diretas de folhas ou medições indiretas utilizando modelos de regressão baseados em galhos, troncos ou da produtividade em geral (GUIMARÃES et al., 2013).

Os métodos indiretos caracterizam-se por manter a integridade das árvores/folhas. Dentre os instrumentos utilizados para tais estimativas, tem-se aqueles que operam em princípios ópticos que derivam por meio da fração de radiação transmitida no dossel, e baseiam-se em uma estatística de probabilidade de distribuição e arranjo de elementos foliares no dossel (PAIVA, 2009).

Nos métodos indiretos a área da folha é inferida a partir de observações de uma outra variável, e são geralmente mais rápidas, podendo ser alterada para uma leitura mais direta, permitindo uma maior amostragem espacial a ser obtida. Quando se comparam com os métodos diretos, estes métodos possuem um interesse maior, por razões práticas (QUEIRÓS, 2013).

A estimativa indireta do índice de área foliar requer recursos capazes de interceptar a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e o uso de instrumentos recentemente criados que indiretamente determinam o IAF de copas de plantas em tempo real. Estes instrumentos estão baseados na penetração direta da luz solar, medida a partir de diferentes ângulos zenitais no decorrer do dia, de modo que são analisadas frações de abertura do tamanho do dossel e a sua distribuição. Para tal, os instrumentos calculam os feixes luminosos e incorporam técnicas de análise de imagens de dosséis, por exemplo, o imageador *Plant Canopy Analyzer* CI-110 (BAMBI, 2007).

2.1.2.1 Uso de fotografias hemisféricas

As medições ópticas, por meio de fotografias hemisféricas, têm sido muito utilizadas em estudos de estimativa de área foliar. Porém, a aglomeração das folhas parece ser o principal fator que causa erros na estimativa indireta do índice de área foliar, desse modo propõe-se o uso de uma câmera digital que apresente uma alta gama dinâmica. Diversos testes e definições de um protocolo padrão para coleta de fotografias a campo estão sendo realizados, para que seja considerado um dispositivo ideal (JONCKHEERE et al., 2004).

As fotografias hemisféricas baseiam-se na análise da fração de espaços vazios do copado, conhecidos por *gap fraction analysis methods*, que se baseiam na determinação da probabilidade de um dado volume de copa ser atravessado por uma sonda sem interceptar qualquer elemento da copa (frequência de espaços vazios). Normalmente, é a própria luz solar que funciona como sonda na aplicação destes métodos. A probabilidade de atravessamento da luz é a função da área foliar acumulada, da distribuição angular dos elementos foliares e do ângulo de incidência da luz solar (QUEIRÓS, 2013).

De acordo com Breda (2003), os métodos de medição *gap fraction* consideram que as folhas são distribuídas aleatoriamente dentro do dossel e são pequenas em tamanho quando comparadas a toda a copa, de modo que, a fração lacuna é equivalente a transmitância, e os métodos baseados na fração de hiato são dependentes da distribuição angular da folha.

Quando o índice de área foliar for estimado a partir da fração lacuna, recomenda-se que seja analisado a heterogeneidade do dossel, e assim seja coletado um número de amostras e utilizada a sua média (GOWER et al., 1999).

A técnica das fotografias hemisféricas utiliza uma câmera com um ângulo de visão de 180°, conhecida como *fish-eye* ou lente olho de peixe. A objetiva *fish-eye* produz uma imagem curvilínea, a qual é a projeção do hemisfério sobre um plano (Figura 1), resultando em uma imagem circular. Segundo as características da projeção desta objetiva, a distância de um ponto até o centro da imagem é determinada por uma função linear deste ângulo (denominada

projeção equidistante ou polar). A projeção equidistante é mais simples, e utilizada em estudos ecológicos. Possui como vantagem que os objetos podem ser facilmente localizados pelas suas coordenadas angulares: ângulo zenital e ângulo azimutal (CARREIRE, 2009).

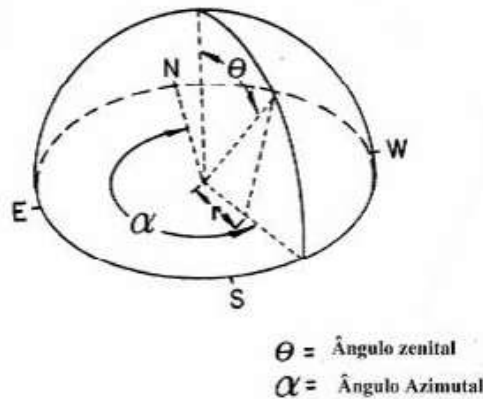


FIGURA 1 – CARACTERÍSTICAS DA PROJEÇÃO DO HEMISFÉRIO SOBRE UM PLANO

FONTE: Carreire (2009)

As fotos podem ser capturadas por debaixo da copa, direcionada para cima, (orientada para zênite) ou acima do dossel olhando para baixo, dependendo exclusivamente do tipo de equipamento utilizado e do tipo de vegetação que se pretende analisar (JONCKHEERE et al., 2004).

2.1.2.2 Estudos e aplicações do equipamento imageador CI-110 *Plant Canopy Analyzer*

Juárez et al. (2009) utilizaram o equipamento imageador CI-110 *Plant Canopy Analyzer* para estimar o índice de área foliar em dois diferentes ecossistemas, sendo um na Floresta Nacional do Tapajós e o outro em uma área de pastagem localizada no município de Santarém, no Pará. A metodologia utilizada baseou-se na análise dos histogramas das fotografias hemisféricas, e em geral, foi considerada satisfatória, pois o erro entre os valores observados e estimados foi de apenas 6%.

Simões et al. (2007) realizaram um estudo comparativo entre os métodos direto e indireto para estimar o índice de área foliar em oliveiras jovens em cultivares na região de Moura, Portugal. Adquiriram-se imagens hemisféricas da

copa dos indivíduos, utilizando o CI-110 *Plant Canopy Analyzer*, obtidas em condições de luminosidade difusa, de modo a obter o máximo contraste possível entre as folhas e o céu. Calculou-se a relação entre ambos os métodos através de análise de regressão.

Em um estudo de caracterização da comunidade herbácea em Rebouças - PR, o CI-110 estimou automaticamente o ângulo médio de folhas do dossel, radiação fotossinteticamente ativa e radiação difusa. A partir da geração dessas variáveis, o autor analisou a influência de tais parâmetros na vegetação do sub-bosque (MEYER JUNIOR, 2014).

O equipamento CI-110 também pode ser utilizado como um caracterizador do dossel, como no estudo realizado por Miranda Neto (2011), que avaliou a abertura do dossel, radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e IAF. Além disso, foram realizadas análises quanto a composição e densidade do estrato de regeneração natural, a partir das fotografias hemisféricas.

Quanto à aplicabilidade do CI-110, destaca-se a medição não destrutiva do IAF e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Como funções secundárias, o equipamento realiza o cálculo de coeficientes de radiação difusa, como média de ângulos de inclinação, folhagem e coeficientes de extinção do dossel. Além do que, os dados podem ser coletados com quaisquer condições de iluminação e mudanças na luz do ambiente (CID, BIO-SCIENCE, 2015).

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O termo sensoriamento remoto foi criado para designar o desenvolvimento da tecnologia de instrumentos capaz de obter imagens da superfície terrestre a distâncias remotas. Logo, é considerada uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Baseia-se na aquisição e interpretação de dados espectrais, medidos remotamente, com o fim de obter informações sobre os alvos da superfície terrestre (JENSEN, 2009; LILLESAND e KIEFER, 2000).

A evolução do sensoriamento remoto por meio do desenvolvimento de sensores mais potentes veio proporcionando ao longo do tempo imagens com resoluções cada vez melhores, associadas às técnicas de extração de informações oriundas do processamento de imagens, ampliando suas aplicações a diversas áreas do conhecimento: levantamento de recursos ambientais, análise ambiental, geologia, agricultura, florestas, estudos urbanos, entre outros (ROCHA, 2000). Além disso, pode fornecer uma excelente alternativa para monitorar o índice de área foliar de culturas, pois não necessita de amostragem destrutiva e análise de laboratório, envolvendo a demanda de custos e tempo, facilitando sua aplicação em uma escala global (JONGSCHAAP, 2006).

O aumento da disponibilidade de dados de Sensoriamento Remoto, juntamente com o desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), tem levado a novas possibilidades de análise geográfica, tanto em escala local quanto global (NIELSEN, 2015).

As técnicas de Sensoriamento Remoto se fundamentam no processo de interação entre a radiação eletromagnética (REM) e os diferentes objetos dos quais se pretendem extrair alguma informação. Esse processo se caracteriza por três diferentes fenômenos, sendo um de absorção, outro de transmissão e o da reflexão de REM incidente sobre o objeto. O registro da intensidade da radiação refletida pode ser feito de diferentes formas e em diferentes níveis de coleta de dados, como em laboratório, em campo, a bordo de aeronaves (aerotransportado) e a bordo de satélite (orbital) (PONZONI et al., 2015).

Técnicas de sensoriamento remoto e modelagem estatística têm sido cada vez mais utilizadas para ajudar em pesquisas florestais. Conjuntos de dados, como os do satélite Landsat (*Multispectral Scanner* - MSS, *Thematic Mapper* - TM e *Enhanced Thematic Mapper Plus* - ETM+), oferecem a capacidade de relacionar a cobertura do solo, dinâmica e características estruturais de florestas, com um baixo custo e eficaz, durante períodos longos e uma variedade de escalas espaciais. Além disso, é possível que os dados de

sensoriamento remoto sejam combinados com diferentes sensores, diferentes regiões de comprimento de onda (ópticas, micro-ondas e térmicas) e aplicáveis a áreas de difíceis acesso (AHMED et al., 2015).

O sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta confiável para caracterizar as paisagens florestais, de modo que permite estimar o índice de área foliar, biomassa, densidade do dossel, entre outros (ZHAO et al., 2012).

2.2.1 Propriedades ópticas da folha

As folhas das árvores são dedicadas principalmente a interceptação da luz e transformação da energia solar em compostos pela fotossíntese, além da regulação da resposta seca-stress através do funcionamento dos estômatos, proteção contra a luz alta e radiação UV, entre outros (BUSSOTI e POLLASTRINI, 2015).

Desempenham um papel importante nos vegetais, porque são nelas que se processam grande parte das reações fotoquímicas para a síntese dos carboidratos, além de outras reações vitais para a vida da planta, como transpiração e respiração (MOREIRA, 2001).

Ponzoni e Shimabukuro (2007) consideram que existem variações na estrutura das folhas em espécies diferentes, e até mesmo folhas de uma mesma espécie, resultante das múltiplas interações entre os componentes do ambiente natural no qual a mesma desenvolve-se. A folha em si pode ser considerada um meio no qual a radiação eletromagnética circula, e dependendo do comprimento de onda e da fisiologia da planta, vão influenciar no processo de interação eletromagnética, assim como em qualquer objeto que incida a radiação.

De acordo com Gates et al. (1965) as propriedades ópticas de uma folha são função de sua composição, morfologia e estrutura interna, as quais definem a variação da resposta espectral registrada pelo sensor ao longo da faixa do espectro eletromagnético. Na região do visível (400 a 700nm) observa-se baixa reflectância devido à absorção da radiação incidente pelos pigmentos, como as clorofilas a e b e os carotenóides; na região do infravermelho próximo (700 a

1300 nm), a reflectância das folhas é alta devido as múltiplas reflexões da radiação nas paredes das células; e na região do infravermelho médio, o teor de água contido nas folhas é responsável pela absorção em 1400 e 1950 nm diminuindo a reflectância da folha.

Na Figura 2 é possível visualizar a curva típica de reflectância espectral média de uma folha verde, madura e saudável.

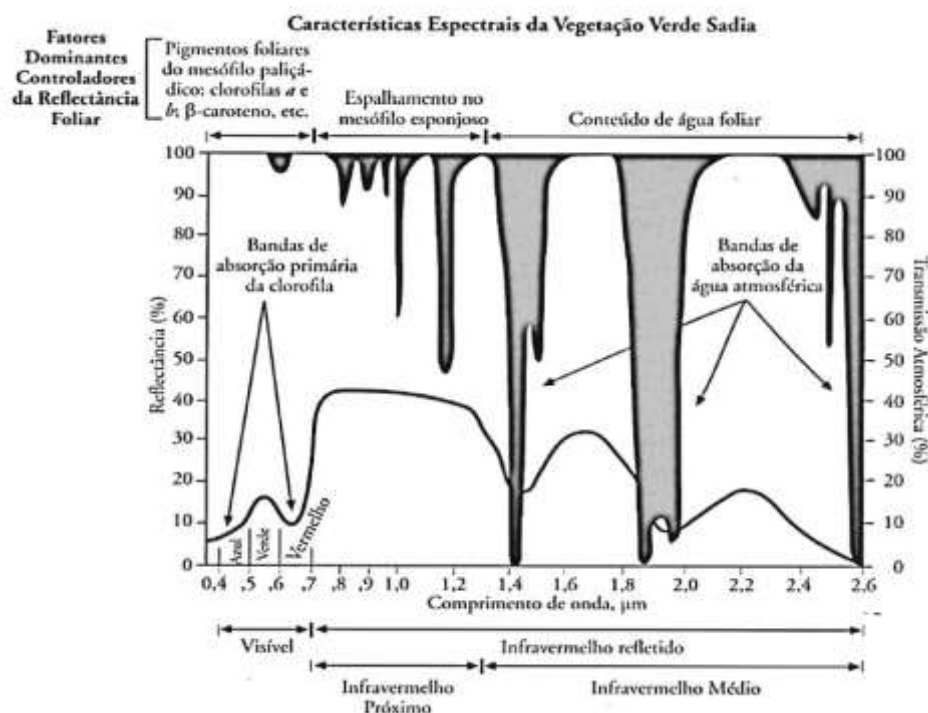


FIGURA 2 – REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE UMA FOLHA VERDE SADIA, PARA INTERVALO DE COMPRIMENTO DE ONDA DE 0,4 E 2,6 μm .

FONTE: Jensen (2009)

As principais características do espectro da folha são a alta absortância no ultravioleta e no azul, a reduzida absortância no verde (relativa aos demais comprimentos de onda do visível), a alta absortância no vermelho, baixa absortância e alta reflectância e transmitância no infravermelho próximo (0,7 – 1,5 μm) e a alta absortância no infravermelho distante (GATES, 1970).

De acordo com Centeno (2009), quando uma planta se encontra doente ou seca, sua produção de clorofila diminui e a folha não necessita absorver muita energia. Logo, os picos de absorção diminuem e a folha passa a refletir também

nas faixas do azul e do vermelho, o que origina a cor amarelada ou marrom das folhas. A estrutura interna da folha controla a reflectância, por isso, a análise da energia refletida no infravermelho próximo auxilia na diferenciação de espécies e condições das folhas em imagens de satélite.

2.2.2 Comportamento espectral da vegetação

Do total de energia absorvido pelas plantas, aproximadamente 75% é irradiada de volta para a atmosfera, e 25% é dissipada através dos fenômenos de convecção e transpiração. Logo, as plantas absorvem apenas a radiação que necessitam para seu desenvolvimento, quase não absorvem a radiação eletromagnética do infravermelho próximo para evitar o superaquecimento; voltam a absorver o infravermelho distante. Portanto, toda a faixa do espectro eletromagnético é usada, no intuito de manter os sinais vitais da planta de forma eficiente (GATES e BENEDICT, 1965).

Jensen (2009), considera que variações da resposta espectral da vegetação estão diretamente relacionadas com a quantidade de biomassa aérea da vegetação. Alguns estudos confirmaram que existe uma relação direta entre resposta no infravermelho próximo e variáveis relacionadas com biomassa, e uma relação inversa entre a resposta no visível, particularmente no vermelho, e variáveis relacionadas com a biomassa das plantas, ou seja, à medida que um dossel vegetal se desenvolve, a sua reflectância aumenta no infravermelho próximo e absorve cada vez mais no vermelho em função do aumento da fotossíntese.

Uma consequência da alta transmitância na região do infravermelho próximo é o fenômeno conhecido como efeito das camadas múltiplas, que ocorre quando várias camadas de folhas se encontram superpostas, como ocorrem em árvores. A energia incidente na camada superior é parcialmente refletida e a porção transmitida atinge a segunda camada. Na superfície da segunda camada, parte da energia é novamente refletida em direção à face inferior da primeira camada, onde é novamente transmitida, desta vez, para fora do dossel. Assim, o total de energia refletida medida na superfície da primeira camada não é

equivalente apenas à energia refletida por esta camada, mas que representa a soma de parcelas refletidas pelas diferentes camadas superpostas (MENESES e ALMEIDA, 2012).

2.2.3 Interação da radiação solar com o dossel da vegetação

O dossel é conceituado como uma série de camada de folhas que absorvem radiação, onde cada uma delas atenua uma fração da radiação incidente baseada nos princípios da Lei de Beer-Lambert (GLENN et al., 2008).

Interações entre a radiação incidente e elementos do dossel são extremamente complexos e descritos por três principais mecanismos físicos: reflexão, absorção e transmissão. A radiação solar refletida no domínio óptico é comumente utilizada em estudos da vegetação, de modo que, a reflectância de dosséis depende de propriedades radiativas das folhas, outros elementos não fotossintéticos do dossel e da sua organização espacial (USTIN et al., 2009; KOKALY et al., 2009; HOMOLOVÁ et al., 2013).

Mecanismos que influenciam a reflectância da folha são bem compreendidos, porém, em nível de dossel continua sendo um desafio, devido a múltiplas interações entre elementos leves e sua estrutura. De modo que, a estrutura mais utilizada para caracterizar o dossel é o Índice de Área Foliar (IAF), porém, não pode descrever completamente os efeitos da sua estrutura (ROSS, 1981; WIDLOWSKI et al., 2004; KUMAR et al., 2001; DISNEY et al., 2006; HOMOLOVÁ et al., 2013).

De acordo com Jones e Vaughan (2010), a reflexão da radiação eletromagnética de dosséis depende das propriedades radiativas dos componentes individuais da vegetação, bem como, folhas, galhos, troncos, água e sombra, e ainda, da arquitetura da copa.

A interpretação de dados de dosséis florestais exige conhecimento de fatores externos, o qual considera-se o tamanho da área de visada do sensor, ângulos azimutais e zenitais de iluminação e de visada, nebulosidade e velocidade do vento, e ainda, fatores internos que são as propriedades ópticas

da superfície do solo e arquitetura do dossel. Além disso, a organização e arranjo espacial das folhas no dossel afeta diretamente a quantidade de luz absorvida pelo sistema (GUYOT et al., 1989; MATLOOBI, 2012; BERRA, 2013).

2.2.4 Índices de vegetação

Nos últimos 40 anos, muitos índices de vegetação foram desenvolvidos para quantificar parâmetros biofísicos da vegetação. Um índice de vegetação ideal deve conter o máximo de sinal relacionado com as características biofísicas específicas e o mínimo de ruídos, como influências do solo e efeitos atmosféricos (JI et al., 2014).

Essas limitações podem ser parcialmente compensadas através dos índices de solo ajustados, como por exemplo o TSAVI. Além disso, esse efeito tende a diminuir conforme o tipo e desenvolvimento da cobertura, de modo que, tende a ser maior em culturas do que em florestas (ZHAO et al., 2012).

Alguns autores conceituam índice de vegetação como sendo a medida não-adimensional de reflectâncias espectrais usando uma operação algébrica, como proporção, diferença, diferença ponderada ou diferença normalizada de duas ou mais bandas, para quantificar características biofísicas da vegetação (SELLERS, 1985; GAMON et al., 1995; JI et al., 2014). Além do que, expressam a contribuição espectral da vegetação, minimizando a influência de fatores como solo, vegetação senescente, ângulo solar, inclinação do terreno e atmosfera (GUTMAN et al., 1995; ALMEIDA et al., 2005).

Os índices de vegetação construídos com medidas espectrais das bandas do vermelho e infravermelho próximo foram criados para ser significativamente relacionados com variáveis agronômicas como índice de área foliar, biomassa acima do solo e teor de clorofila. Pesquisas já demonstraram o seu potencial para aplicações agrícolas, tais como, estimar e prever o rendimento de culturas, monitorar as condições da colheita, mapear e classificar os tipos de cultura e auxiliar as atividades de agricultura de precisão (ZHAO et al., 2007).

Desde a década de 1970, vários índices de vegetação têm sido desenvolvidos, de modo que, podem ser classificados em cinco grupos:

- I) Índices de vegetação simples, que usam uma razão simples como a proporção, diferença, ou uma diferença normalizada entre bandas. Como é o caso do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1974), e de razão simples (SR), proposto por Jordan (1969);
- II) Índices de vegetação para ajustar a influência do solo. É o caso do índice de vegetação perpendicular (PVI) e índice de vegetação ponderada (WDVI), ambos propostos por Richardson e Wiegand (1977), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) (HUETE, 1988), índice de vegetação ajustado ao solo transformada (TSAVI) (BARET e GUYOT, 1991), índice de vegetação modificado ajustado ao solo (MSAVI) (QI et al., 1994), índice de vegetação otimizado ao solo ajustado (IAVAS), e o índice de vegetação generalizada ajustado para solo (GESAVI) (GILABERT et al., 2002; RONDEAUX et al., 1996);
- III) Índices de vegetação para compensar o efeito atmosférico. É o caso do índice de vegetação resistente à atmosfera (ARVI) (KAUFMAN e TANRÉ, 1992) e do índice de monitoramento ambiental global (GEMI) (PINTY e VERSTRAETE, 1992);
- IV) Índices de vegetação para compensar o efeito atmosférico e do solo. É o exemplo do índice de vegetação por diferença normalizada modificada (MNDVI) (LIU e HUETE, 1995), índice de vegetação reforçado (EVI) (HUETE et al., 2002), e o índice de vegetação reforçado com duas bandas (EVI2) (JIANG et al., 2008);
- V) Índices de vegetação destinadas a aumentar a linearidade do índice com parâmetros biofísicos. É o caso do índice de vegetação não-linear (NLI) (GOEL e QI, 1994), o índice de vegetação de diferença renormalizada (RDVI) (ROUJEAN e BREON, 1995), simples razão modificado (MSR) (CHEN, 1996), índice de vegetação por diferença normalizada verde (GNDVI) (GITELSON et al., 1996), índice de vegetação linear (LVI) (ÜNSALAN e BOYER, 2004), e o índice de vegetação por diferença normalizada linearizado (LNDVI) (JIANG e HUETE, 2010).

2.2.5 Sensores ópticos de alta resolução espacial

As imagens orbitais de alta resolução espacial estão disponíveis desde a década de 1990, porém, eram disponibilizadas apenas para programas de reconhecimento militar estritamente confidencial. Desde então, existiam projetos para utilizar dados orbitais de alta resolução espacial para fins comerciais, porém, somente em 1999 com o lançamento do sensor IKONOS II (após falha do lançamento do IKONOS I), estas imagens passaram a ser comercializadas para usuários (SCHREIER e DECH, 2005).

Desde então, outros satélites de alta resolução foram lançados, entre os quais destaca-se: EROS-A (1,8m), QuickBird (0,6m), OrbView-3 (1m), EROS-B (0,7m), Worldview-1 (0,5m), Geo-Eye (0,4m) e Worldview-2 (BROVELLI et al., 2008).

De acordo com Erus e Loménie (2010), os novos sistemas de satélite Pléiades e QuickBird fornecem imagens de satélite de até 70 cm por pixel de resolução, de modo que, surge novos desafios para o processamento e interpretação de tais imagens. A exploração de uma grande quantidade de dados será possível pela concepção de algoritmos de análise de alto desempenho para os sistemas de tomadas de decisão.

As imagens de satélite de alta resolução são obtidas a partir de um campo de visão instantânea, do inglês *Instantaneous Field of View* (IFOV), com uma trajetória suave, de modo que, produz pouca distorção geométrica sobre uma região (OH e LEE, 2015).

Um pequeno IFOV é desejável quando deseja-se registrar altos detalhes espaciais. Dessa forma, quanto menor for o tamanho do IFOV maior será a capacidade de se detectar nas imagens os menores elementos que integram a cena. A resolução espacial deve ser entendida como uma medida geométrica e, portanto, não deve ser considerada como sinônimo de pixel. Pixel representa uma taxa de amostragem no terreno, que mede no espaço geométrico do elemento de resolução no terreno, o valor da radiância no alvo (MENESES e ALMEIDA, 2012).

A Figura 3 mostra as imagens de três sensores ópticos com diferentes resoluções espaciais, de modo que fica evidente estabelecer uma comparação entre a resolução espacial e a escala de visualização da imagem.



a)

(b)

(c)

FIGURA 3 – IMAGENS DE SATÉLITES DE DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS DE UMA PORÇÃO DO LAGO PARANOÁ – BRASÍLIA - DF.

a) Landsat (resolução espacial de 30m); b) SPOT 3 (resolução espacial de 10m); c) IKONOS II (resolução espacial de 1m).

FONTE: Meneses e Almeida (2012)

Nos últimos anos, com o avanço dos satélites de alta resolução espacial, a melhoria da resolução geométrica permitiu o desenvolvimento de mapas acurados, os quais não eram possíveis a partir de dados orbitais de média resolução. Atualmente é possível produzir representações precisas de um local específico da terra em um curto espaço de tempo, pois, vários satélites de observação da terra são operacionalizados 24 horas por dia (SAID et al., 2013).

De acordo com Levin et al. (2014), as imagens orbitais de alta resolução têm permitido estudos detalhados referentes a questões ecológicas e urbanas, que até então, teriam sido estudadas de maneira mais ampla e superficial, pois, o tempo de revisita dos satélites comerciais está permitindo cobrir grandes áreas em uma base de informações diária.

2.2.5.1 Pléiades

Em 29 de janeiro de 2001, um acordo intergovernamental entre a França e a Itália, denominado como “ORFEO” (*Optical and Radar Federated Earth Observation*), previa a construção de um sistema que servisse a comunidade e o sistema de defesa desses países. Desse modo, ambas as nações resolveram cooperar para a criação de um satélite de observação da terra baseado em sensores ópticos e de radar (SMSC, 2015).

A constelação Pléiades é composta por dois pequenos satélites, denominados Pléiades 1A e 1B, que juntos conseguem adquirir imagens orbitais diárias de altíssima resolução espacial, para qualquer região do planeta. A missão surgiu a partir de demandas de usuários da missão SPOT e foi iniciado pela França e Itália, no Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) (EMBRAPA, 2015).

De acordo com Poli et al. (2015) a missão Pléiades é a mais recente, capaz de fornecer imagens ópticas para uso civil em VHR para qualquer ponto da superfície da terra. O Pléiades 1-A foi lançado em 17 de dezembro de 2011 e o Pléiades 1-B lançado em 02 de dezembro de 2012. Os satélites voam na mesma órbita, sincronizada com o sol, a uma altitude de 694km, com uma fase de 180° e nó descendente às 10:30 horas. O sensor pode chegar a uma resolução de 0,5m no modo pancromático e 2m no modo multiespectral na direção vertical.

Segundo Astrium (2012), sensor Pléiades é sensível a todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, de modo que, cada banda apresenta uma curva de resposta espectral característica em função do comprimento de banda, conforme pode ser visualizado na Figura 4.

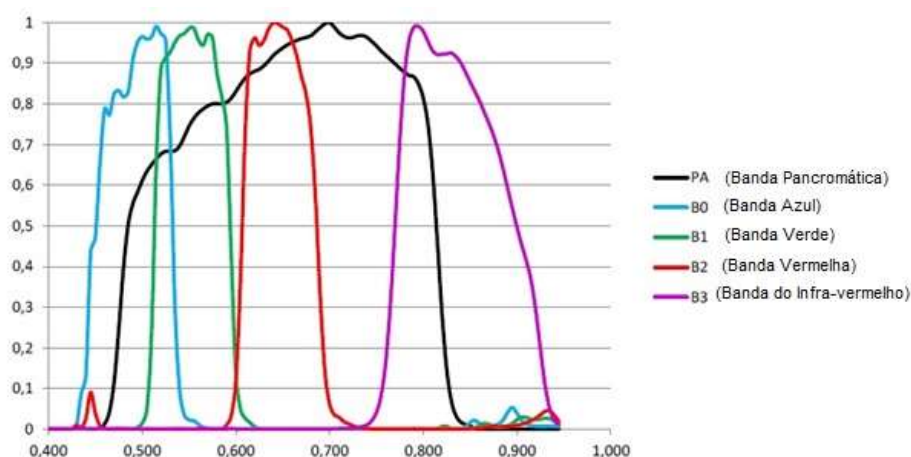


FIGURA 4 – CURVA ESPECTRAL DE CADA BANDA DO SENSOR PLÉIADES.

FONTE: Adaptado de Astrium (2012)

Os dados do sensor Pléiades oferecem uma combinação ideal em cobertura, resolução e úteis para aplicações em gestão de risco, mapeamento urbano, agricultura de precisão, entre outros. A Tabela 1 apresenta algumas características do sensor utilizado neste estudo.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DO SENSOR PLÉIADES 1B

Características do sensor Pléiades 1B	
Ângulo zenital solar	78,13569
Resolução radiométrica	12 <i>bits</i>
Resolução temporal	1 dia
Altitude	694 km
Inclinação	98,2°
Período	98,79 minutos
Ciclo	26 dias
Resolução espacial (Pancromática)	0, 5 m
Resolução espacial (Multiespectral)	2 m
Capacidade de aquisição	450 segmentos/dia

Fonte: Astrium (2012)

O sensor Pléiades tem uma capacidade de aquisição de imagens muito grande, de modo que a capacidade máxima teórica chega a 1 milhão de quilômetros quadrados por dia, totalizando 2 milhões para os dois satélites (ASTRIUM, 2012).

2.2.6 Processamento digital de imagens

O processamento digital de imagens consiste na execução de operações matemáticas dos dados, visando às suas transformações em imagens de melhores qualidades espectrais e espaciais, e que sejam mais apropriadas para uma determinada aplicação, de modo que, deve ser orientado de maneiras diferentes para cada tipo de problema (MENESES e ALMEIDA, 2012).

A identificação de objetos em imagens produzidas por sensores remotos mediante interpretação visual é eficaz quando o interesse é acessar as características geométricas e a aparência geral desses objetos. No entanto, as imagens são compostas por *pixels*, e a visão humana permite a extração de informações mediante a análise de inúmeros *pixels* em conjunto, e não de forma isolada. Para alguns tipos de avaliação, como estimativas da área ocupada por determinada cultura agrícola, por exemplo, o processamento digital dos dados pode trazer ganhos significativos (PONZONI et al., 2012).

O processamento digital de imagens objetiva melhorar uma determinada característica ou qualidade da imagem, de modo que quando comparado a imagem resultante com a original, esta apresente uma maior confiabilidade na interpretação do usuário (BHANDARI et al., 2015).

De acordo com Novo (2008), processamento digital de imagens cumpre alguns propósitos como:

- Melhorar a qualidade geométrica e radiométrica dos dados brutos;
- Melhorar a aparência visual das imagens, para facilitar a interpretação, realçando as feições de interesse;
- Automatizar processos de extrações de informações, para permitir o rápido tratamento de grandes volumes de dados;
- Permitir a integração de dados de diferentes fontes;
- Facilitar o desenvolvimento de modelos e a geração de produtos que representam a grandeza geofísica ou biofísica para usuários cujo interesse seja apenas aplicar a informação final.

De acordo com Crósta (1992), o processamento digital de imagens trata das técnicas utilizadas para identificação, extração, condensação, e realce da feição de interesse para uma determinada finalidade, a partir de uma vasta quantidade de dados que compõe as imagens de satélite. O resultado desse processo é a produção de outras imagens contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

Jensen (2009) considera que as técnicas de processamento digital de imagens podem ser divididas em três etapas distintas, sendo:

- I) Pré-processamento: inclui a restauração quantitativa da imagem para corrigir degradações geométricas e radiométrica, inseridas pelo sensor. O resultado é uma imagem corrigida em termos geométricos e radiométricos.
- II) Realce: são técnicas que melhoram a qualidade visual e transformam as imagens para uma melhor interpretação.
- III) Análise: está relacionada com a extração de informações da imagem, onde define-se técnicas de reconhecimento de padrões.

O processamento digital de imagens é configurado por algoritmos especializados, que disponibiliza para o usuário a aplicação de uma grande variedade de técnicas de processamento. Os algoritmos tratam matematicamente a imagem como um dado diretamente ao processo físico que o criou. Dessa maneira, caberá ao usuário e não apenas ao computador, a análise e a interpretação dos dados contidos na imagem (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Com o aumento da resolução espacial das imagens, vem a complexidade adicional no que diz respeito ao processamento digital dessas imagens. O aumento de informações disponíveis permite uma maior interpretação com base na forma e na textura dos recursos terrestres, porém, as técnicas atuais para processar e analisar esses dados podem não ser aplicáveis as informações adicionais fornecidas por dados de alta resolução espacial (JOHANSEN et al., 2007).

2.2.6.1 Correção atmosférica

De acordo com Ponzoni et al. (2015) o sol é a principal fonte de radiação eletromagnética (REM) utilizada no estudo de recursos naturais, realizado mediante a aplicação das técnicas de Sensoriamento Remoto. A radiação emitida por esse astro trafega no espaço na forma de um fluxo que contém diferentes qualidades de REM. Logo, cada “qualidade” de REM, denominada comprimento de onda, é emitida pelo sol com intensidade específica. Na Figura 5 é possível observar a intensidade do fluxo radiante emitido pelo sol para cada comprimento de onda, na amplitude espectral compreendida entre as regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio.

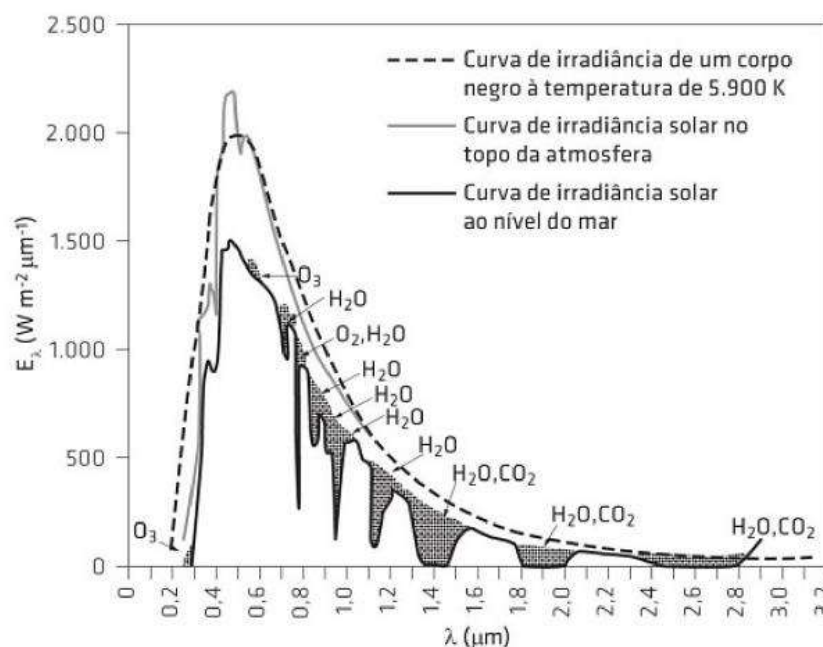


FIGURA 5 – INTENSIDADE DO FLUXO RADIANTE EMITIDO PELO SOL
 FONTE: Ponzoni et al. (2015) adaptado de Swain e Davis (1978).

A linha tracejada no gráfico representa a intensidade do fluxo radiante em cada comprimento de onda, a linha cheia mais escura representa a mesma intensidade, mas determinada na superfície da terra. Logo, é possível perceber que a intensidade da REM emitida pelo sol sofre atenuação em virtude de interferência de diferentes componentes contidos na atmosfera (PONZONI et al., 2015).

De acordo com Centeno (2009), a atmosfera é o meio onde a energia eletromagnética se propaga, tanto no seu percurso entre a fonte e o alvo como entre o alvo e o sensor. A interação entre a energia e a atmosfera origina alterações que podem mascarar o verdadeiro valor da energia proveniente do alvo.

A atmosfera afeta a radiância medida em qualquer ponto da imagem, de duas maneiras. Primeiro, ela atua como um refletor, adicionando uma radiância extra ao sinal que é detectado pelo sensor. Segundo, ela atua como um absorvedor, atenuando a intensidade de energia que ilumina o alvo na superfície. Quando a atenuação é acima de um valor, a transparência da atmosfera torna-se opaca em determinados comprimentos de onda, impossibilitando a obtenção de imagens. Portanto, deve-se verificar a degradação que pode ter sido causada pelo espalhamento atmosférico, avaliando quanto de radiação foi adicionada ao pixel (MENESES e ALMEIDA, 2012).

A qualidade dos dados de observação da terra tem uma grande importância, devido a isso, a comunidade internacional busca um acordo sobre os processos de calibração e validação de imagens orbitais. O desafio é garantir que todas as medições e parâmetros sejam consistentes e precisos. Os processos de calibração e validação dos sensores abordam variáveis como: correção atmosférica, caracterização espectral e correção geométrica (BRIVIO et al., 2001).

Quando os efeitos atmosféricos são ignorados, a superfície refletora da radiação é assumida como sendo lambertiana e o sinal gravado pelos sensores remotos é corrigido apenas para condições de iluminação no momento da aquisição da imagem (BRIVIO et al., 2001).

2.2.6.2 Correção radiométrica

Dados ópticos de sensoriamento remoto são afetados pelas características do sensor, geometria de iluminação e as condições atmosféricas. As características são expressas através do número digital (ND), que são consideradas unidades arbitrárias. Existe uma relação conhecida entre o ND e a luminosidade do sensor, possibilitando a correção atmosférica a partir da radiância e irradiância no topo da atmosfera (VAUDOUR et al., 2014).

De acordo com Noguchi (2004) resolução radiométrica pode ser conceituada como o número possível de valores digitais, que representam os níveis de cinza utilizados para representar os dados de uma imagem coletada por determinado sensor. É definida pelo número de *bits* (dígitos binários), que representa um valor digital (nível de cinza máximo), conforme pode ser visualizado na Figura 6.

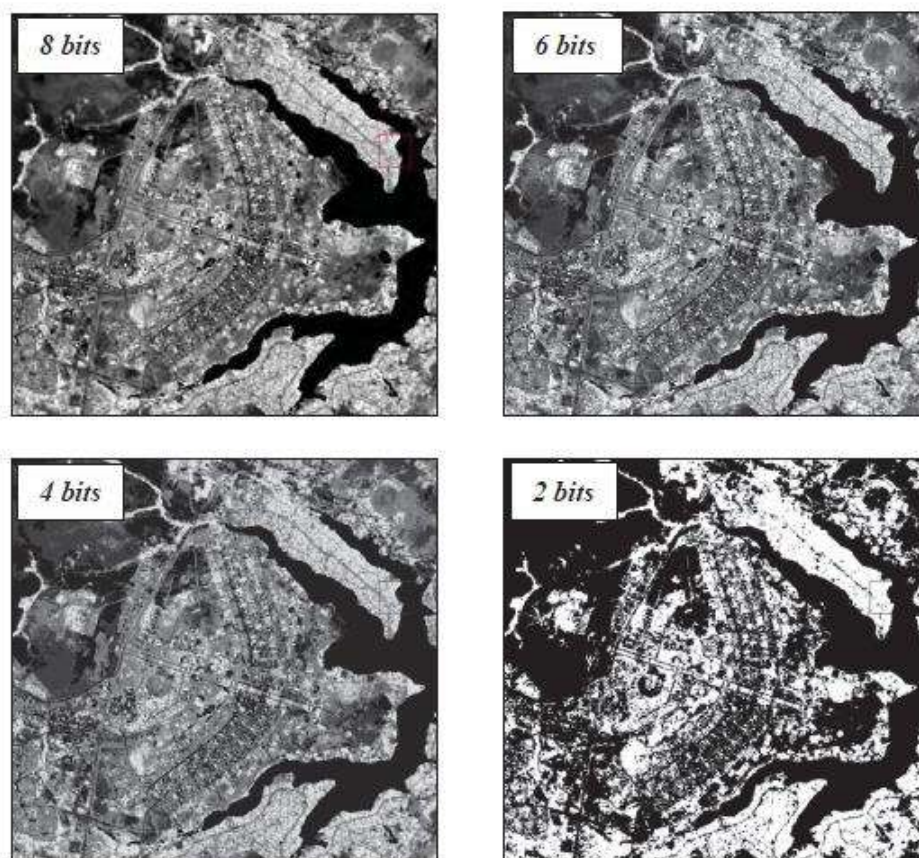


FIGURA 6 – EXEMPLOS DE IMAGENS COM DIFERENTES NÍVEIS DE RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA.

FONTE: Meneses e Almeida (2012).

A correção dos dados dos sensores, a partir da correção radiométrica, objetiva padronizar os dados de uma maneira que toda a comunidade possa ter acesso, de modo que, esses dados são convertidos para radiância, reflectância ou outra unidade física bem definida (BRIVIO et al., 2001).

A correção radiométrica de satélites multi-temporais é um procedimento de transformação importante em avaliações florestais de grande escala, principalmente quando envolve aquisição de imagens em datas diferentes ou de várias faixas adjacentes. As características espectrais, sob a forma de número digital (ND) obtidas para o mesmo objeto, por vezes, apresentam valores diferentes (XU et al., 2012).

De acordo com Xu et al. (2012) existem duas maneiras de realizar a correção radiométrica. Uma delas é a correção absoluta, que visa converter os números digitais gravados pelo sensor, para a verdadeira reflectância. Este modelo estima o caminho feito pela radiação, dispersão e absorção de gases e aerossóis, e converte a reflectância pelo brilho do sensor. Este método corrige a diferença dos números digitais (ND) causadas pela influência atmosférica, mas a maioria dos modelos requer a medição terrestre *in situ* de propriedades atmosféricas.

O outro tipo de método de correção é a relativa, não necessitando de medições a campo, utilizando apenas uma informação derivada da própria imagem. Existem duas categorias, uma delas é baseada na referência anterior, cria uma imagem como referência e ajusta imagens a partir de uma relação linear entre as imagens. A outra categoria, baseia-se nos métodos de referência externos e na aplicação de algoritmos (XU et al., 2012).

A demanda por correção radiométrica em imagens de alta resolução espectral tem aumentado, embora ainda existam limitações quanto as informações de calibração dos sensores e do processamento dessas imagens. Logo, é necessário compreender o processo físico de medição e fornecer os dados necessários para validação e verificação de resultados (LÓPEZ et al., 2011).

2.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Burrough e McDonnel (1998) definiram Sistemas de Informações Geográficas (SIG) como sendo um conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real para um objetivo específico.

Os SIGs permitem analisar e processar dados, visualizar a distribuição espacial e manipular dados geográficos, bem como, gerar e atualizar banco de dados para fins planejamento e tomada de decisão (PERAGÓN, 2016).

De acordo com Moreira (2001), de modo geral, qualquer SIG é capaz de:

- Representar graficamente informações de natureza espacial;
- Representar informações gráficas sob a forma de vetores (pontos, linhas e polígonos) e/ou imagens digitais (matrizes de pixels);
- Representar informações com base em critérios alfanuméricos, semelhante a um sistema de gerenciamento de banco de dados tradicional, e com base em relações topológicas, como convergência, adjacência e interceptação;
- Realizar operações de aritmética de polígonos;
- Limitar o acesso e controlar a entrada de dados através de um modelo de dados previamente construído;
- Oferecer recursos para a composição de saídas e geração de resultados, sob a forma de mapas, gráficos e tabelas.

As principais características de um SIG são a capacidade de inserir e integrar, em uma única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários, cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos do terreno. Além disso, deve oferecer mecanismos para combinar tais informações, através de algoritmos de manipulação e análise (ARANOFF, 1989).

2.4 FLORESTA OMBRÓFILA MISTA (FOM)

A Floresta Ombrófila Mista (FOM) também conhecida como Floresta com Araucária, ou Pinheiral, é uma das unidades fitoecológicas mais representativas da região sul do Brasil. Possui a presença marcante da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (DALLA LANA, 2013; VELOSO et al., 1991).

Possui remanescentes florestais nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Minas Gerais. Atualmente encontra-se bastante fragmentada, devido a exploração intensiva de madeiras de grande valor econômico, como *Araucaria angustifolia* (pinheiro-brasileiro), *Ocotea porosa* (Imbuia), *Luehea divaricata* (açoita-cavalo) e *Cedrela fissilis* (cedro) (NASCIMENTO et al., 2001).

A Floresta Ombrófila Mista apresenta quatro subformações distintas, sendo: a) Aluvial: em terrenos antigos dos flúvios – *Araucaria angustifolia* associada com *Podocarpus lambertii* e *Drimys brasiliensis* ou gêneros da família Lauraceae; b) Submontana: de 50 até 400 m de altitude; c) Montana: de 400 até 1000 m de altitude, onde a *Araucaria angustifolia* associada com *Ocotea Porosa* formam agrupamentos característicos; d) Alto Montana: situada a mais de 1000m de altitude, onde a *Araucaria angustifolia* está associada com *Podocarpus lambertii*, *Drimys brasiliensis*, *Cedrela fissilis* e gêneros da família Lauraceae e Myrtaceae. No Paraná as subformações mais comuns da Floresta Ombrófila Mista são Montana e Alto Montana, apresentando aspecto de uma associação pura, em função a dominância fisionômica imposta pela Araucária (DURIGAN, 2003).

Existem muitas pesquisas sobre a Araucária e a Floresta Ombrófila Mista, além do que, poucas espécies brasileiras foram tão estudadas. Porém, a Floresta de Araucária ainda precisa ser mais estudada e pesquisada, pois muitos temas, principalmente ecológicos, ainda permanecem não esclarecidos pela ciência, principalmente no que se refere à sua regeneração natural, seu comportamento dinâmico e seu processo sucessional (PÉLLICO NETTO et al., 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado na Estação Experimental Rudi Arno Seitz da Universidade Federal do Paraná, localizada no município de São João do Triunfo, Região Centro-Sul do estado do Paraná, a 125 km de Curitiba.

A área possui cerca de 32 ha, apresenta uma altitude de 780 m e as coordenadas geográficas de latitude Sul são 25° 34' 18" e longitude Oeste de 50° 05' 56", conforme pode ser visualizado na Figura 7 (PIZZATO, 1999).

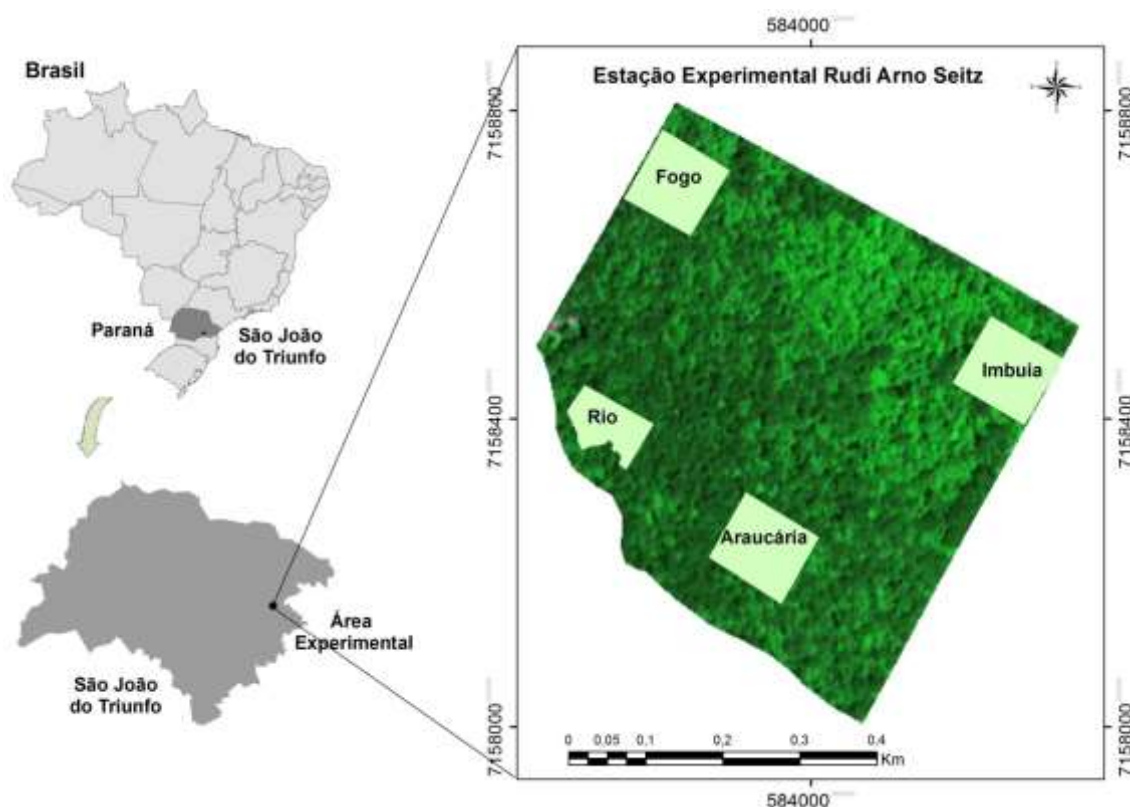


FIGURA 7 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ
FONTE: Elaborado pela autora

A área de estudo compreende um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana (FOM), objeto do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) Sítio 9 – Floresta com Araucária e suas transições. Em 1995 foram instaladas quatro parcelas permanentes que são medidas anualmente sempre no mês de julho, onde são denominadas de Araucária (parcela 1), Fogo

(parcela 2) e Imbuia (parcela 3) possuem uma área de 1 ha cada (100 x 100 m). A parcela 4 denominada de Rio possui uma área de aproximadamente 0,5 ha e forma irregular, devido a presença de um rio que margeia um dos lados da parcela.

3.1.1 Clima

O clima da região é classificado como Cfb segundo Köppen, temperado, clima subtropical úmido mesotérmico, de verões frescos, invernos com ocorrências de geadas severas e frequentes, não apresentando estação seca. A média das temperaturas dos meses mais quentes não ultrapassa 22°C e dos meses mais frios é inferior a 18°C, geralmente com umidade relativa do ar média acentuada de 78,9%, e moderado índice pluviométrico, com precipitação média anual de 2.209 mm (VALÉRIO et al., 2008).

3.1.2 Vegetação

A vegetação da área de estudo pertence a um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana (FOM), que é denominada floresta úmida, com chuvas uniformemente distribuídas ao longo do ano, do grego, *ombros*, chuva e de caráter misto, pois alude à coexistência de coníferas (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze) e de folhosas, angiospermas dicotiledôneas, na estrutura da vegetação (MARCHIORI, 2006).

Em um levantamento realizado pelo PROBIO (2007) cerca de 10% do estado do Paraná é coberto por essa tipologia, apresentando aproximadamente 20.000 km² do estado. Na Figura 8 é possível visualizar a área de abrangência da Floresta Ombrófila Mista no estado do Paraná.

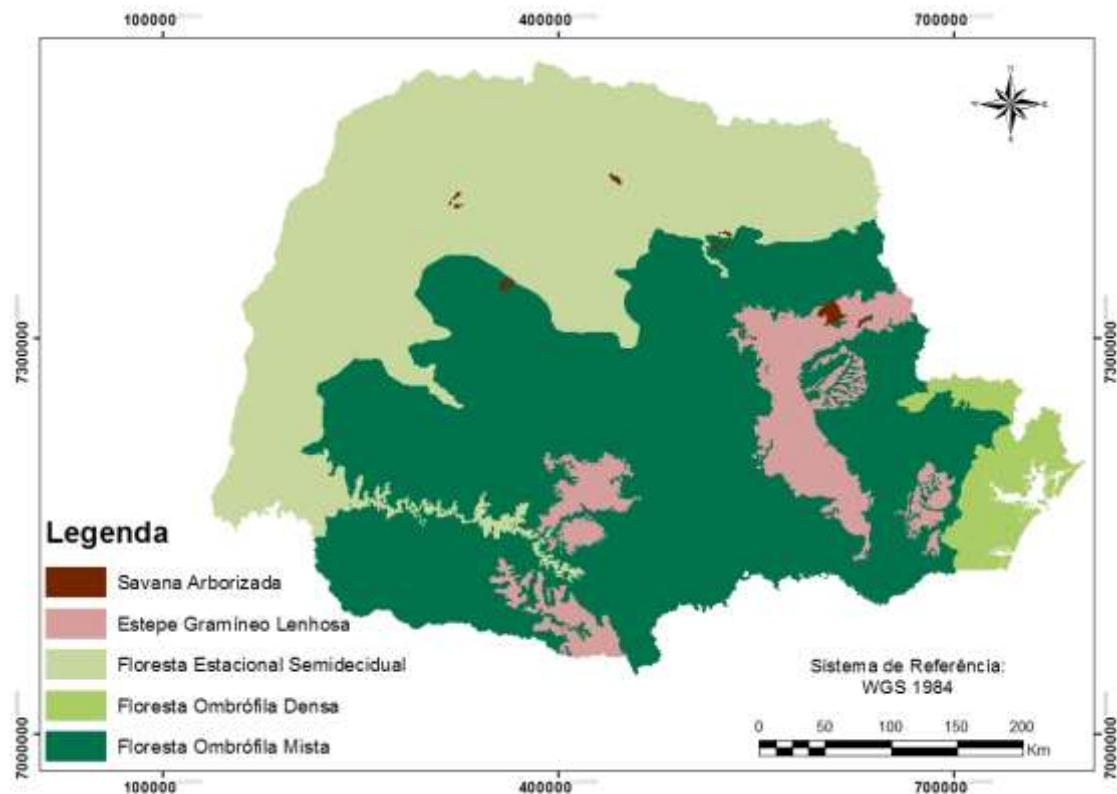


FIGURA 8 – MAPA TEMÁTICO DA DIVISÃO FITOGEOGRÁFICA DO ESTADO DO PARANÁ

FONTE: Adaptado de Roderjan et al. (2002)

A composição florística dessa tipologia florestal é caracterizada pela associação da araucária com grupos diferenciados de espécies, como por exemplo, canela imbuia (*Ocotea porosa*), erva-mate (*Ilex paraguariensis*), canelas (Lauraceae) e várias espécies da família Myrtaceae, entre outras (PROBIO, 2007).

Valente et al. (2010) consideram que de acordo com a composição do dossel é possível dividir a estação experimental Rudi Arno Seitz em três fisionomias, sendo: I) área com predominância de Araucárias; II) área com predominância de Araucária e folhosas; III) área com predominância de folhosas.

A Araucária é a espécie dominante do estrato superior, podendo atingir 35 metros de altura e diâmetros superiores a um metro, cujos indivíduos são facilmente distinguidos dos demais, quando adultos, por apresentarem copas umbeliformes e troncos retilíneos, livres de ramificações até uma altura correspondente a 2/3 do total (CASSOL, 2013).

3.1.3 Solo

Os solos da área de estudo classificam-se como associações de Argissolos vermelho-amarelo, Cambissolos háplicos tb e Latossolos vermelhos, ambos distróficos, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

3.2 MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado foi separado em dois grupos, sendo: I) base cartográfica; II) equipamentos de processamento e aplicativos.

3.2.1 Base cartográfica

- Arquivo vetorial – Formato *Shapefile* – Unidades Federativas do Brasil – Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006);
- Arquivo vetorial – Formato *Shapefile* – Mapa da Divisão Política Administrativa do Paraná do ano de 2006. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006);
- Arquivo Vetorial – Formato *Shapefile* – Limite vetorial da Estação Experimental Rudi Arno Seitz, no município de São João do Triunfo, Paraná. Disponibilizado pelo Laboratório de Inventário Florestal da UFPR (PELD - LIF- BIOFIX);
- Imagens orbitais do satélite Pléiades 1B com resolução espacial de 2m, e banda pancromática de 0,5 m, referente à 02/02/2014. Disponibilizada pelo Laboratório de Inventário Florestal da UFPR (PELD - LIF- BIOFIX).

3.2.2. Equipamentos e aplicativos para processamento dos dados

- Equipamento imageador CI-110 *Plant Canopy Analyzer*;
- Suporte para o equipamento CI-110;
- GPS de navegação, modelo Garmin 62s;

- Bússola e fita métrica para auxílio na localização a campo dos pontos demarcados inicialmente em ambiente SIG;
- Aplicativos ArcGis 10.3 (UFPR) e Envi 5.0 (FUNPAR).

3.2.2.1 Caracterização do CI-110 *Plant Canopy Analyzer*

O equipamento imageador CI-110 *Plant Canopy Analyzer* é um sensor passivo terrestre, utilizado para medir a quantidade de radiação solar incidente no espectro visível. Pode ser utilizado com um GPS acoplado e em todas as condições do céu (mesmo em diferentes condições de iluminação), devido ao filtro óptico acoplado integrado, que garante que a radiação dispersa não afete o sensor através da restrição de radiação superior a 490 nm. Isto minimiza o efeito da luz difundida pela folha e permite que as medições sejam conduzidas na parte inferior ou interior da cobertura vegetal, com variadas condições de iluminação (SCHAEFER et al., 2014).

De acordo com Meyer Junior (2014) o CI-110 é composto por uma haste munida de 24 sensores, e na ponta da haste, encontra-se a lente “olho de peixe” que permite calcular o IAF, o coeficiente de transmissão para penetração difusa, o índice de abertura do dossel, o ângulo médio de inclinação das folhas e o coeficiente de extinção do dossel. A haste é conectada a um *tablet* por um cabo USB, onde está instalado um software de análise de cobertura (CID-110), conforme pode ser visualizado na Figura 9.



FIGURA 9 – MEDIÇÕES SENDO ADQUIRIDAS E INTERFACE GRÁFICA DO CI-110
FONTE: Autora

Os dados da amostra são processados e armazenados em dois arquivos no formato “.txt”, e outro arquivo no formato “jpg” é gerado referente à imagem hemisférica que foi capturada em resolução de até 768 x 494 pixels (MEYER JUNIOR, 2014).

O software CI-110 calcula os coeficientes de transmissão de feixes solares, ou a fração do céu visível por debaixo da copa das plantas, utilizando o procedimento de *Gap Fraction Inversion* (NORMAN E CAMPBELL, 1989).

As imagens da copa das plantas são divididas em zênite e azimuth, conforme pode ser visualizado na Figura 10. A fração do céu (coeficiente de transmissão dos raios solares) é analisada através da divisão do céu e pelos pixels da imagem, onde são atribuídos valores de 0 a 1, o qual 0 significa que o céu não é visível abaixo do dossel da planta, e 1 quando toda área é composta por céu, ou seja, não ocorre nenhuma cobertura de folhagem (CI-110 *Plant Canopy Analyzer*).

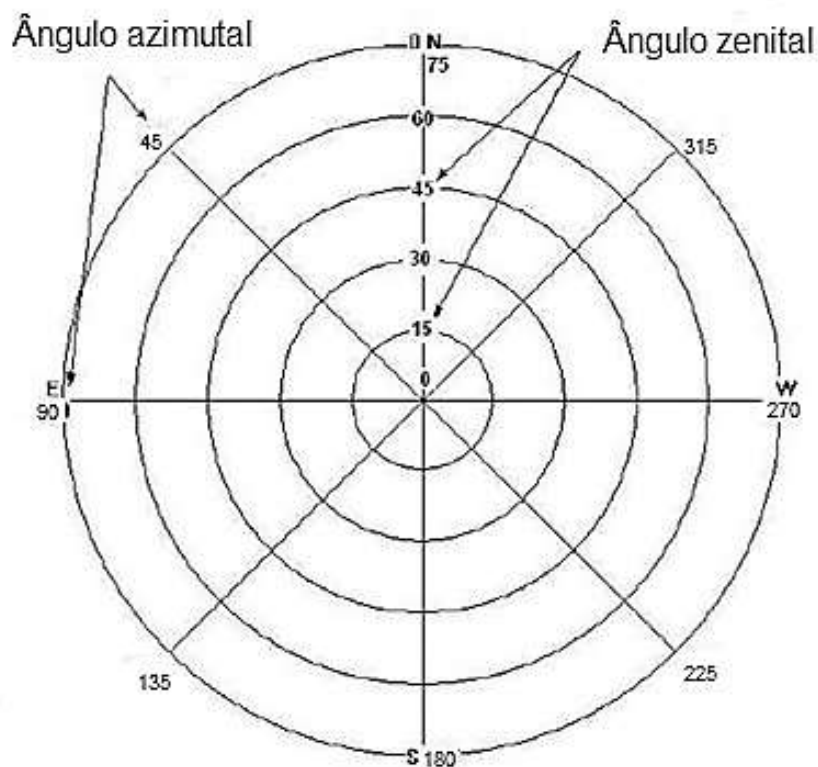


FIGURA 10 – DIVISÕES DE ZÊNITE E AZIMUTE
FONTE: CID, BIO-SCIENCE (2015)

As frações de clareiras são obtidas dividindo o número de pixels branco, que representam o céu, pelo número total de pixel (pretos + brancos), de uma superfície definida sobre o plano da imagem, considerando as dimensões da grade de análise e resolução em pixels, empregada no instante de obtenção da imagem (CARREIRE, 2009).

A realização do processamento das fotografias hemisféricas é realizada a partir das seguintes equações.

I) Coeficiente de transmissão para a penetração de radiação difusa

$$t_d = 2\Delta\varphi \sum_{\varphi_i=\varphi_l}^{\varphi=n} \tau\varphi_i \sin\varphi_i \cos\varphi_i \quad (1)$$

Onde:

I = coeficiente de transmissão para a penetração de radiação difusa;

$\Delta\varphi$ = incremento de ângulo zenital em radianos;

$\tau\varphi$ = coeficiente de transmissão para a penetração dos raios (ou a fração do céu visível) em cada área de ângulo Zenith. 0 significa que não há céu visível e 1 significa que toda área é céu.

II) Índice de Área Foliar (IAF)

$$\tau_{\varphi i} = e^{-k\varphi i L} \quad (2)$$

$$K\varphi i = \sqrt{\frac{x^2 + \tan^2 \varphi i}{A}} \quad (3)$$

$$k\varphi i = 1 \quad (4)$$

$$k\varphi i = \frac{2 \tan \varphi i}{\pi} \quad (5)$$

$$k\varphi i = \frac{1}{2 \cos \varphi i} \quad (6)$$

Onde:

K = coeficiente de extinção do dossel;

A = função polinomial de a

$$A = x + 1,774 (x + 1,182)^{-0,733}$$

x = ângulo de distribuição das folhas.

III) Ângulo de inclinação médio das folhagens do dossel

$$a = \tan^{-1} x \quad (0^\circ \leq a \leq 90^\circ) \quad (7)$$

$$X = b/a \quad (8)$$

Onde:

b = projeção horizontal da folhagem;

x = ângulo de distribuição das folhas.

3.3 COLETA DE DADOS

Os dados foram organizados em duas modalidades, sendo, trabalho de campo e em gabinete, como pode ser visualizado na Figura 11.

A primeira etapa da análise de dados foi realizada em gabinete e consistiu no planejamento dos pontos a serem amostrados no campo, onde os mesmos foram definidos a partir de uma análise prévia da imagem Pléiades, no intuito de caracterizar o local e as parcelas permanentes existentes. Elaborou-se um *grid* de forma sistemática, no intuito de obter uma melhor representatividade da área. Após esse planejamento inicial, realizou-se a etapa de coleta de dados a campo, onde os pontos foram amostrados com o equipamento imageador CI-110, e com isso, foram geradas as informações referentes ao IAF terrestre. A etapa de campo foi realizada no mês de fevereiro.

Após essa etapa inicial, o presente estudo teve continuidade apenas em gabinete, onde realizou-se o processamento digital da imagem Pléiades, geração dos índices de vegetação e do IAF orbital. Esses dados foram compilados e processados em ambiente SIG. Posteriormente realizou-se uma análise de correlação entre o IAF orbital e terrestre e dos índices de vegetação. A partir dos melhores resultados, foram gerados os modelos de regressão para estimativa do índice de área foliar para Floresta Ombrófila Mista.

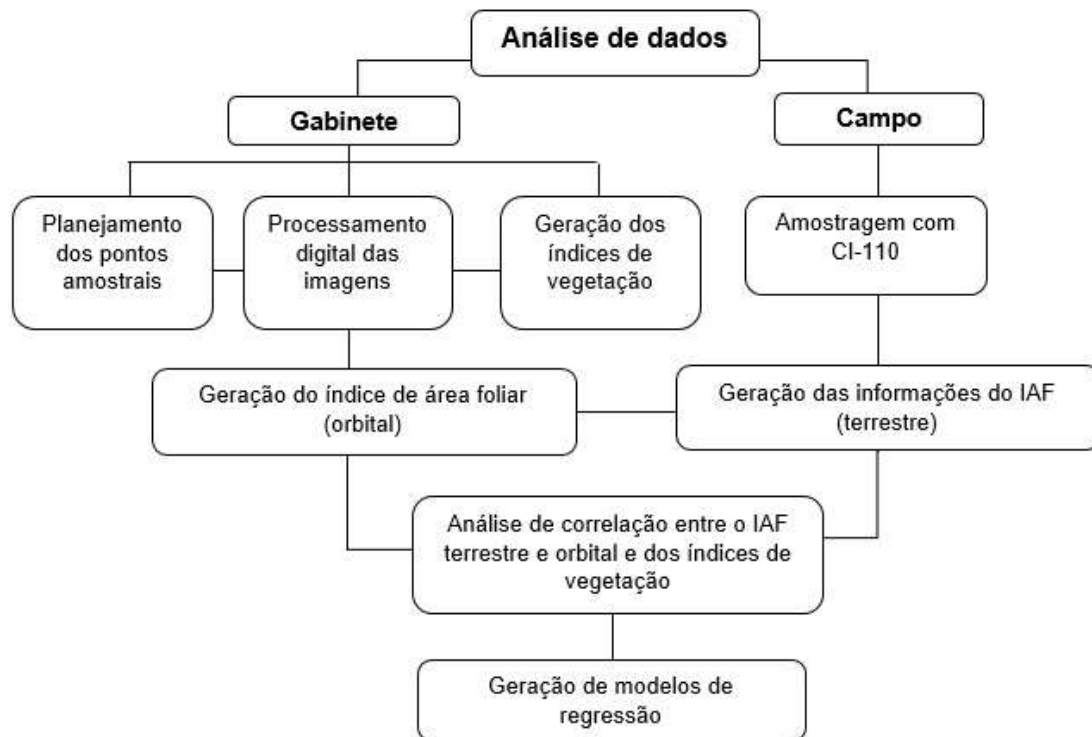


FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DE ORGANIZAÇÃO DA COLETA DE DADOS

Fonte: Autora

3.3.1. Organização dos pontos a serem coletados em ambiente SIG

Conforme citado anteriormente, a área de estudo possui 4 parcelas permanentes, que são inventariadas anualmente. Cada parcela mede 100x100 m, divididas em subparcelas medindo 10x10 m.

Para facilitar a coleta de dados a campo, definiu-se que os pontos imageados seriam os vértices das subparcelas. Além disso, as subparcelas localizadas nas extremidades das parcelas foram desconsideradas para evitar efeito de borda e possíveis alterações nos dados.

Quanto à área total, distribuiu-se 33 pontos de forma sistemática, equidistantes aproximadamente 100 m, abrangendo toda a estação experimental.

Os pontos foram organizados em um plano cartesiano, de modo que, na coleta de dados fosse possível identificá-los a partir das coordenadas geográficas e do croqui gerado em ambiente SIG (Figura 12).

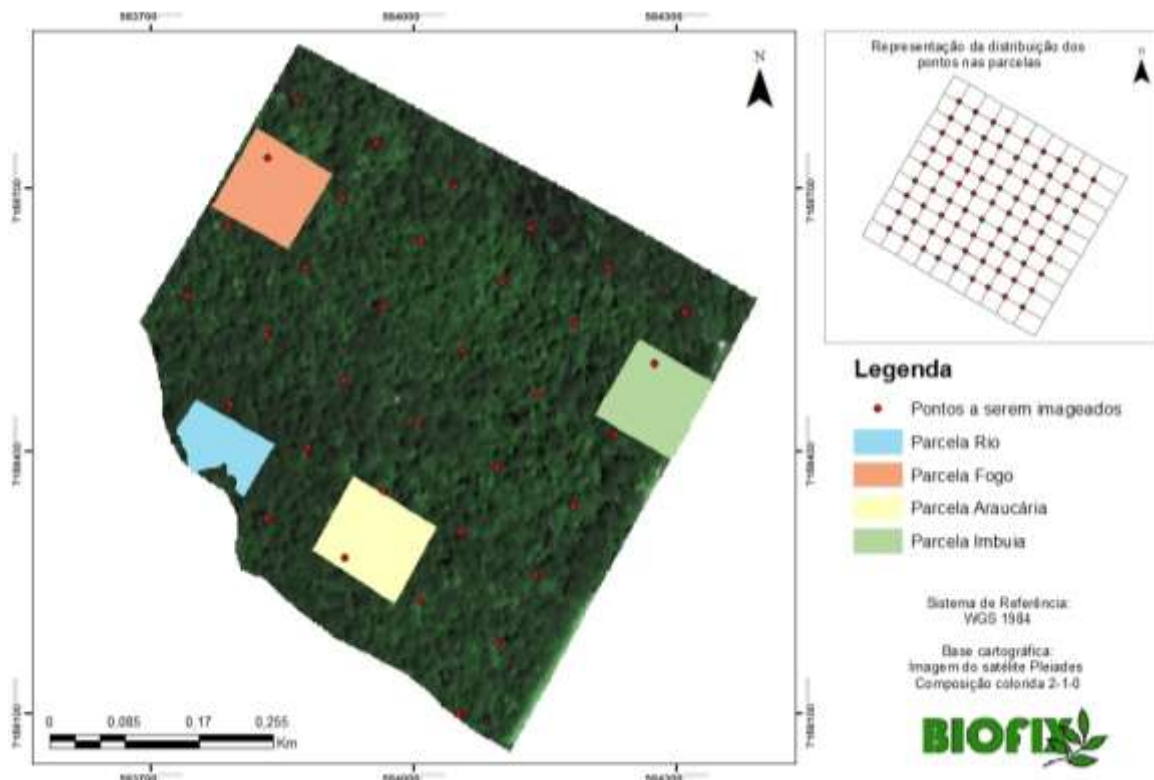


FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS IMAGEADOS NA ÁREA DE ESTUDO

FONTE: Autora

3.3.2 Coleta de dados em campo

Os pontos pré-estabelecidos foram localizados no campo a partir das coordenadas geográficas, com auxílio de GPS de navegação e bússola.

Os vértices das subparcelas estão demarcados com piquetes, desse modo, para facilitar a coleta de dados, esses piquetes foram marcados com fita zebra. Para os pontos da área total demarcou-se a árvore mais próxima.

Os pontos foram imageados utilizando o equipamento CI-110, juntamente com um suporte que serve de apoio para o equipamento, de forma que a fotografia hemisférica é obtida sempre na mesma altura em relação ao solo, para evitar possíveis erros de amostragem e estabelecer um padrão de coleta.

O suporte foi projetado de modo que a lente *fisheye* ficasse paralela em relação ao solo, a uma altura de aproximadamente 15 cm. Considera-se que esta altura é suficiente para evitar que a parte inferior da câmera toque o solo ou a vegetação. Além disso, todos os pontos amostrais foram fotografados e filmados com câmera digital comum, no intuito de agregar informações ao banco de

dados, e para possíveis consultas, caso fosse necessário. Logo, é possível visualizar as etapas da coleta de campo, a partir das Figuras 13 e 14.

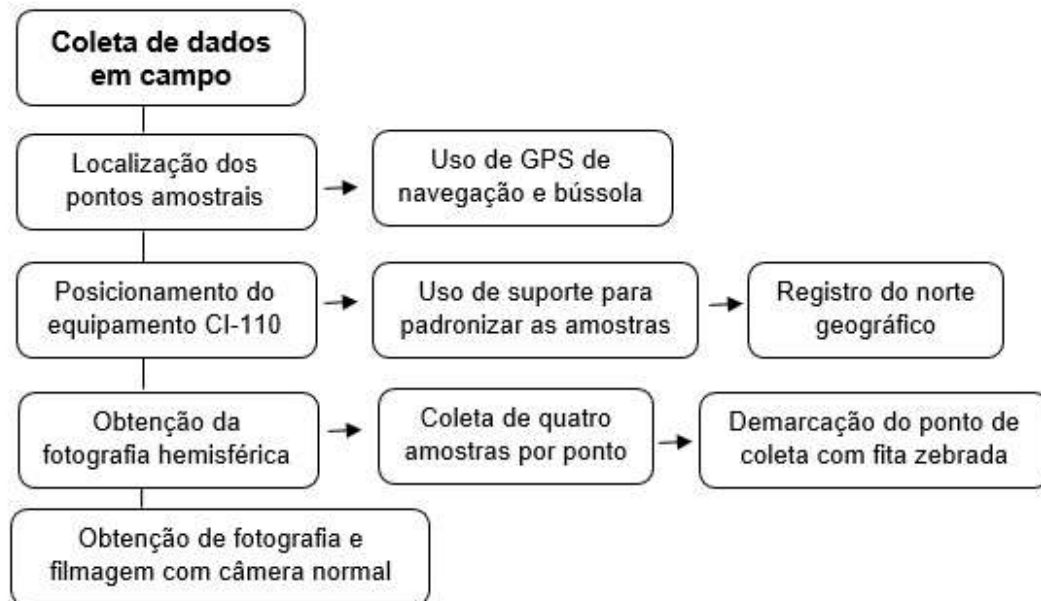


FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA COLETA DE DADOS EM CAMPO

FONTE: Autora



FIGURA 14 – ETAPAS DA COLETA DE DADOS A CAMPO (LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS, POSICIONAMENTO DO CI-110 E CAPTURA DA FOTOGRAFIA HEMISFÉRICA, DEMARCAÇÃO DO PONTO COM FITA ZEBRADA).

FONTE: Autora

Realizou-se o registro do norte geográfico na imagem, indicando onde houve maior incidência de raios solares e possibilitou a realização de algumas compensações pelo equipamento CI-110, e logo os índices de área foliar e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foram calculados automaticamente, conforme está representado na Figura 15.

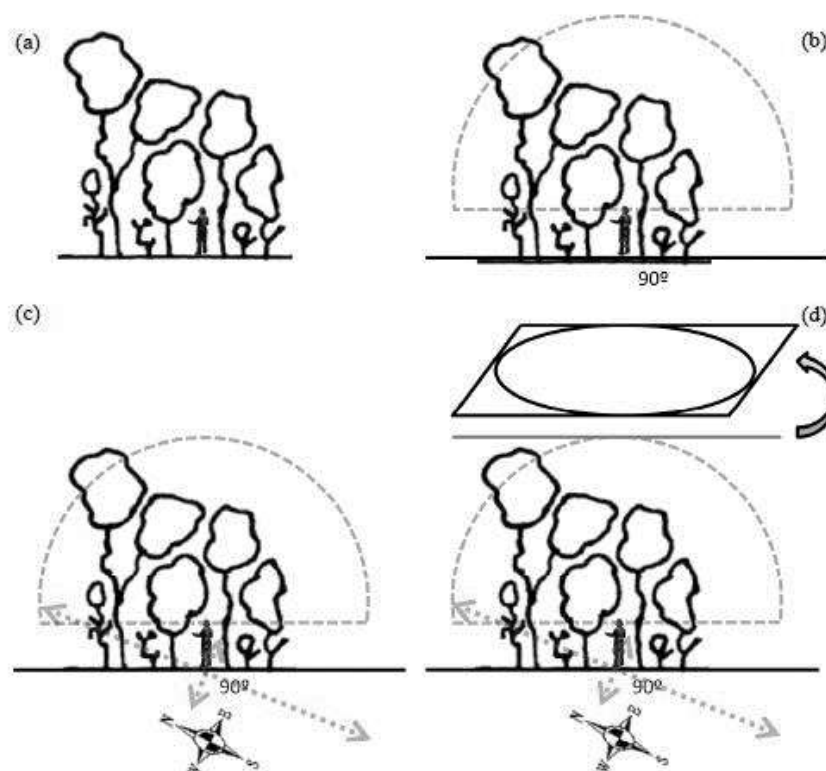


FIGURA 15 – TÉCNICA DA FOTOGRAFIA HEMISFÉRICA DE DOSSEL

- a) Escolha do ponto amostral e registro das coordenadas; b) Posicionamento do equipamento CI -110; c) Indicação da orientação do ponto que será fotografado; d) Obtenção da fotografia hemisférica do dossel.

FONTE: Peixoto (2012)

Cada ponto foi imageado quatro vezes, e realizou-se a média desses dados, para uma melhor estimativa, conforme sugere o fabricante.

A segmentação da imagem, conhecida como *threshold*, é uma das etapas mais cruciais na obtenção de fotografias hemisféricas do dossel, pois, determina a segmentação necessária para separar o primeiro plano (dossel) a partir do fundo (céu). Pode ser realizada manualmente, selecionando para cada imagem um limiar de cinza que permite a melhor separação do dossel e do céu. Porém, vários autores têm sugerido o uso da segmentação automática, pois quando utilizada manualmente o resultado é altamente dependente da exposição da imagem e da experiência pessoal do operador (CESCATTI, 2007).

No presente estudo optou-se por utilizar a segmentação automática disponibilizada pelo equipamento CI-110, com intuito de evitar possíveis erros de amostragem.

Jonckheere et al. (2005) consideram que *thresholding* é o método mais simples e fundamental de segmentação. Em uma imagem de cinza, os pixels

com intensidades inferiores ou iguais do limiar pertencem a uma classe (por exemplo dossel), e os com valores superiores pertencem a outra classe (por exemplo céu).

Alguns cuidados na coleta de dados são imprescindíveis devido a possíveis problemas de fotometria (ajuste de entrada de luz na fotografia) ou mesmo indícios de sujeira na lente (pelo fato dos ambientes fotografados serem úmidos e sujeitos às condições climáticas). A captura das imagens foi realizada no início da manhã e final da tarde, onde há predominância de radiação difusa. É preciso estar atento a estes detalhes para não serem gastos esforços de amostragem desnecessários e comprometer a qualidade do estudo.

A câmera do CI-110 foi ajustada para apresentar uma ótima precisão do IAF obtido de forma automática, em todos os tipos de vegetação. A lente azul não evita que as fotografias hemisféricas fiquem escuras (CID BIO-SCIENCE, 2015).

3.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DA IMAGEM DE SATÉLITE

O processamento digital de imagem objetiva a redução das distorções geométricas e radiométricas. Os erros geométricos podem ocorrer tanto pelas variações de altitude e velocidade do satélite, quanto pelos efeitos introduzidos pela distorção panorâmica, curvatura da Terra ou refração atmosférica (JENSEN, 2009). Os erros radiométricos podem ser introduzidos por defeitos nos instrumentos do sensor ou pelas condições atmosféricas, variações de iluminação da região imageada ou geometria da visão (LILLESAND e KIEFER, 2000).

3.4.1 Correção atmosférica

Realizou-se a correção atmosférica através do método por subtração do objeto escuro ou DOS (*Dark Object Subtraction*) desenvolvido por Chavez (1988) que estima a interferência atmosférica diretamente da imagem, ou seja, com base nos números digitais de cada banda espectral.

Ponzoni e Shimabukuro (2007) consideram que esse método funciona em toda e qualquer cena e em qualquer banda espectral, existem pixels que deveriam assumir o valor “0” seja nas imagens originais com NDs, quanto naquelas convertidas para o fator de reflectância bidirecional aparente, uma vez que estes poderiam não receber radiação incidente.

3.4.2 Correção radiométrica

A conversão de Números Digitais (ND) para valores físicos, que tem como objetivo permitir a caracterização espectral de objetos, bem como, permitir a elaboração de cálculos que incluem dados de imagens de diferentes bandas espectrais ou de diferentes sensores. Cada sensor, em cada banda espectral, tem seu próprio critério para discretizar os valores de radiância medidos na escala específica de sua resolução radiométrica. Quando a conversão não é realizada, é impossível realizar a comparação entre NDs de bandas diferentes, inclusive para o mesmo sensor, bem como de sensores diferentes. A caracterização espectral de objetos torna-se inviável. Como solução a essa limitação, estão as conversões de ND para valores físicos mediante o conhecimento de algumas características tanto do sensor quanto das condições ambientais em que as imagens foram geradas (PONZONI, 2012).

Os dados dos números digitais (ND) foram convertidos para radiância no topo da atmosfera (L_{toa}), a partir da seguinte equação:

$$L_{toa} \left(\frac{W}{m^2} \cdot sr \cdot \mu m \right) = L_{min} \lambda + \frac{L_{max} \lambda - L_{min} \lambda}{2^n} \times ND(\lambda) \quad (9)$$

Onde:

L_{toa} = radiância no topo da atmosfera;

ND = número digital da respectiva banda;

n = número de bits (resolução radiométrica);

L_{min} e $L_{máx}$ = valores de calibração da radiância mínimo e máximo.

Após a transformação para radiância no topo da atmosfera, os valores foram transformados para Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) em cada uma das bandas, a partir da seguinte equação:

$$pa = \frac{\pi \cdot L_{toa} \cdot \lambda \cdot d^2}{E_{sun} \cdot \lambda \cdot \cos \theta} \quad (10)$$

Onde:

pa = FRB aparente;

L_{toa} = radiância no topo da atmosfera;

d = distância terra-sol em unidades astronômicas;

E_{sun} = irradiância solar média no topo da atmosfera;

θ = ângulo solar zenital.

3.5 GERAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Estudos iniciais no monitoramento da vegetação demonstraram que o uso das bandas vermelha e infravermelho próximo foram particularmente bem combinadas no estudo da vegetação. As diferentes combinações entre estas bandas são chamadas de índices de vegetação. Os índices de vegetação são fórmulas matemáticas desenvolvidas para avaliar a cobertura vegetal qualitativamente e quantitativamente, usando medidas espectrais (CARREIRE, 2009).

Uma grande variedade de índices de vegetação é proposta na literatura para estimar índices de vegetação, biomassa e espacializar a sua distribuição na superfície terrestre, são definidos como a combinação de duas ou mais. No presente estudo foram gerados os seguintes índices de vegetação:

3.5.1 Índice de Vegetação de Razão Simples de Bandas (*Simple Ratio* – SR)

Foi o primeiro índice a ser usado (JORDAN, 1969). É obtido pela divisão de valores das bandas do infravermelho próximo e do vermelho, segundo a equação:

$$SR = \frac{\rho_3}{\rho_2} \quad (11)$$

Onde:

ρ_3 = Banda 3 do sensor Pléiades (Infravermelho próximo);

ρ_2 = Banda 2 do sensor Pléiades (vermelho).

3.5.2 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI)

Rouse et al. (1974) normalizaram a razão simples para o intervalo de -1 a +1. Esse índice é a razão entre a diferença das refletividades das bandas no infravermelho próximo e no vermelho e pela soma dessas mesmas refletividades, conforme a seguinte equação:

$$NDVI = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2} \quad (12)$$

Onde:

ρ_3 = banda 3 do sensor Pléiades (Infravermelho próximo);

ρ_2 = banda 2 do sensor Pléiades (vermelho).

De acordo com Chen et al. (2015) o NDVI é o índice de vegetação mais utilizado e estudado, está disponibilizado gratuitamente mundialmente a partir de uma série de projetos de sensoriamento remoto. O Índice de Área Foliar (IAF) pode ser derivado do NDVI, considerando que existe uma forte relação entre eles.

3.5.3 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI)

O SAVI é um índice de vegetação derivado do NDVI, porém, leva em consideração efeitos do solo exposto nas imagens analisadas. Huete et al. (1985), verificaram que a sensibilidade dos índices de vegetação em relação ao material de fundo (solo) é maior em dosséis com níveis médios de cobertura vegetal. Por isso, introduz-se no SAVI uma constante “L” que tem a função de

minimizar o efeito do solo no resultado final do índice. Desse modo, a equação para cálculo do SAVI fica:

$$SAVI = \frac{(1+Ls)(\rho_3-\rho_2)}{Ls+\rho_3+\rho_2} \quad (13)$$

Onde:

ρ_3 = banda 3 do sensor Pléiades (Infravermelho próximo);

ρ_2 = banda 2 do sensor Pléiades (vermelho);

Ls = constante denominada de fator de ajuste do índice SAVI, podendo assumir valores de 0,25 a 1 dependendo da cobertura do solo.

Conforme Huete (1988), um valor para Ls de 0,25 é indicado para vegetação densa e de 0,5 para vegetação com densidade intermediária, quando o valor de Ls for 1 para vegetação com baixa densidade. Se o valor do SAVI for igual a 0, seus valores tornam-se igual aos valores do NDVI.

3.5.4 Índice de Vegetação Melhorado (*Enhanced Vegetation Index* – EVI)

De acordo com Ponzoni (2012), o índice de vegetação melhorado (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade de sua detecção em regiões com maiores densidades de biomassa, e para reduzir a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel. Desse modo, o EVI é calculado por meio da seguinte equação:

$$EVI = \frac{G(\rho_3 - \rho_2)}{L + \rho_3 + C1*\rho_2 - C2*\rho_1} \quad (14)$$

Onde:

L= fator de ajuste para o solo;

G=fator de ganho;

C1 e C2= coeficientes de ajuste para efeitos de aerossóis da atmosfera.

ρ_3 = banda 3 do sensor Pléiades (Infravermelho próximo);

ρ_2 = banda 2 do sensor Pléiades (vermelho);

ρ_1 = banda 1 do sensor Pléiades (azul);

3.6 GERAÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES

O IAF é um índice biofísico definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área utilizada por esta vegetação, sendo um indicador da biomassa de cada pixel da imagem. No presente estudo, foram testados dois modelos de estimativa do índice de área foliar a partir da imagem orbital.

a) Modelo 1: proposto pelo manual de formação avançada em algoritmos de balanço energético da superfície terrestre (SEBAL, 2002), onde leva-se em consideração o índice de vegetação SAVI, a partir da seguinte equação:

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69-SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (15)$$

Onde:

\ln = logaritmo natural;

SAVI = índice de vegetação ajustado ao solo.

b) Modelo 2: proposto por Duchemin et al. (2006), gerado a partir do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), representado pela seguinte equação:

$$IAF = \frac{\ln(1-NDVI)}{-0,54} \quad (16)$$

Onde:

\ln = logaritmo natural;

NDVI = índice de vegetação da diferença normalizada.

3.7 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE O IAF_{CI-110} E O IAF_{PLÉIADES}

Realizou-se a análise de correlação linear entre o índice de área foliar obtido a partir do equipamento imageador *CI-110 Plant Canopy Analyzer* (IAF_{CI-110}) e do obtido a partir da imagem orbital (IAF_{Pléiades}). O coeficiente de correlação de Pearson é descrito pela equação 17.

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (17)$$

Onde:

r = coeficiente de correlação de Pearson;

$n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i$ = é a covariância entre as variáveis x e y ;

$[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2]$ = é o desvio padrão de x ;

$[n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]$ = é o desvio padrão de y .

De acordo com Correa (2003), o valor de r varia entre +1 e -1, de modo que, +1 indica correlação positiva entre as variáveis e -1 indica a correlação negativa entre as variáveis, logo o valor 0 indica que não há correlação linear entre as variáveis, ou ainda, a correlação não é linear, caso exista.

Correa (2003) considera ainda, que quanto mais próximo o valor de r estiver de 1, mais forte será a correlação linear. Quanto mais próximo o valor de r estiver de 0, mais fraca será a correlação linear, de modo que, são estabelecidos critérios para verificar os níveis de correlação, sendo:

- $0 < |r| < 0,3$: a correlação é fraca e fica difícil estabelecer relação entre as variáveis;
- $0,3 \leq |r| < 0,6$: a correlação é fraca, porém, considera-se que existe uma relativa correlação entre as variáveis;
- $0,6 \geq |r| \leq 1$: a correlação é de média para alta, de modo que, a relação entre as variáveis é significativa;

3.8 GERAÇÃO DE MODELOS DE REGRESSÃO DE AVALIAÇÃO DO IAF

Os chamados métodos de regressão de avaliação do IAF, baseiam-se no desenvolvimento e aplicação de modelos que descrevem a relação biométrica que se pode estabelecer entre variáveis. De modo que, para desenvolver tais modelos é necessário conhecer o índice de área foliar obtido a campo (QUEIRÓS, 2013).

Após a análise de correlação, as variáveis foram utilizadas para ajustar equações de regressão, tendo o IAF obtido a campo como variável dependente (IAF_{CI-110}), sendo considerado como verdade de campo, e os índices de vegetação, consideradas variáveis independentes. Foram utilizados apenas os índices de vegetação que apresentaram correlação linear com o IAF_{CI-110} , os demais foram desconsiderados.

Considera-se importante que os dados tenham sido coletados em datas próximas, preferencialmente na mesma estação do ano, pois o IAF é uma variável dinâmica, de modo que, essa divergência pode acarretar no comprometimento do modelo.

3.8.1 Análise dos condicionantes de regressão

Brena et al. (1978) consideram que três aspectos estatísticos importantes devem ser considerados no uso de equações de regressão. O primeiro refere-se à coleta de dados, onde deve-se distribuir um certo número de amostras a fim de se obter uma certa precisão. O segundo aspecto relaciona-se com a escolha do modelo, porém, não existe um critério claro para sua escolha, sendo considerado mais um problema de lógica do que propriamente um problema estatístico, dependendo muito da experiência do pesquisador. O terceiro aspecto refere-se à verificação das condições a serem cumpridas para a análise de regressão. De acordo com Ribeiro Junior (2013) essas condições referem-se as pressuposições de normalidade, de independência e de homogeneidade de variâncias dos erros experimentais, os quais podem ser verificadas pelo gráfico de probabilidade normal e diagrama de dispersão dos erros.

3.8.2 Modelos de regressão testados

No presente estudo foram testados modelos lineares e logarítmicos, conforme pode ser visualizado na Tabela 2.

TABELA 2 – MODELOS DE REGRESSÃO DE AVALIAÇÃO DO IAF TESTADOS

Tipo de modelo	Equação
Linear	$Y = \beta_0 + \beta_1 * x$
Logartimizado	$Y = \beta_0 + \beta_1 * \ln(x)$
Linear	$Y = \beta_0 + \beta_1 * x^2$

Em que: $Y = IAF_{CI-110}$; $X = \text{índices de vegetação}$.

Fonte: Autora

3.8.3. Critérios de seleção para os melhores modelos de regressão testados

Para seleção do melhor modelo foram observados os seguintes critérios: coeficiente de determinação múltipla (R^2) e erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{yx\%}$), além da análise gráfica dos resíduos.

O coeficiente de determinação múltipla (R^2) é dado pela equação 18:

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{reg}}{SQ_{tot}} \quad (18)$$

Em que R^2 representa o coeficiente de determinação múltipla, SQ_{reg} é a Soma dos quadrados da regressão, dada pela variável observada menos variável estimada ao quadrado e SQ_{total} é a Soma dos quadrados total, dada pela variável observada menos média das variáveis observadas ao quadrado.

De acordo com Cassol (2013), o erro padrão da estimativa (S_{yx}) caracteriza o erro cometido ao ajustar os resíduos aos valores reais observados. Quanto menor o valor do S_{yx} melhor é considerado o ajuste da equação. O erro padrão relativo ($S_{yx\%}$) é o erro padrão expresso em percentagem, sendo mais apropriado quando se deseja comparar os dados em escalas diferentes. O S_{yx} e $S_{yx\%}$ são calculados conforme a Equação 19.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{SQ_{\text{resíduos}}}{n-p}} \qquad S_{yx} \% = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}_{\text{real}}} * 100 \qquad (19)$$

Em que: S_{yx} representa o Erro Padrão da Estimativa; $S_{yx}\%$ representa o Erro Padrão da Estimativa porcentual; \bar{Y}_{real} representa a média das variáveis observadas.

Para a análise gráfica dos resíduos foram utilizados os resíduos na forma relativa (percentagem) em função da variável dependente estimada, para comparar os diversos modelos ajustados, sendo calculado pela equação 20:

$$\text{Res}(\%) = \frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} * 100 \qquad (20)$$

Em que: Y_i representa o IAF estimado a partir do CI-110, considerado como verdade de campo; \hat{Y}_i o IAF estimado pelos modelos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTIMATIVA DO IAF PELO MÉTODO DE IMAGEAMENTO TERRESTRE

No presente estudo, a estimativa do índice de área foliar foi obtida de forma automática pelo equipamento CI-110. Porém, algumas unidades amostrais foram analisadas visualmente quanto à dispersão do histograma, no intuito de identificar o melhor contraste do dossel florestal em relação ao céu. Na Figura 16 é possível visualizar uma fotografia hemisférica da área de estudo, referente a uma unidade amostral da área total, apresentando suas diversas formas de composição.

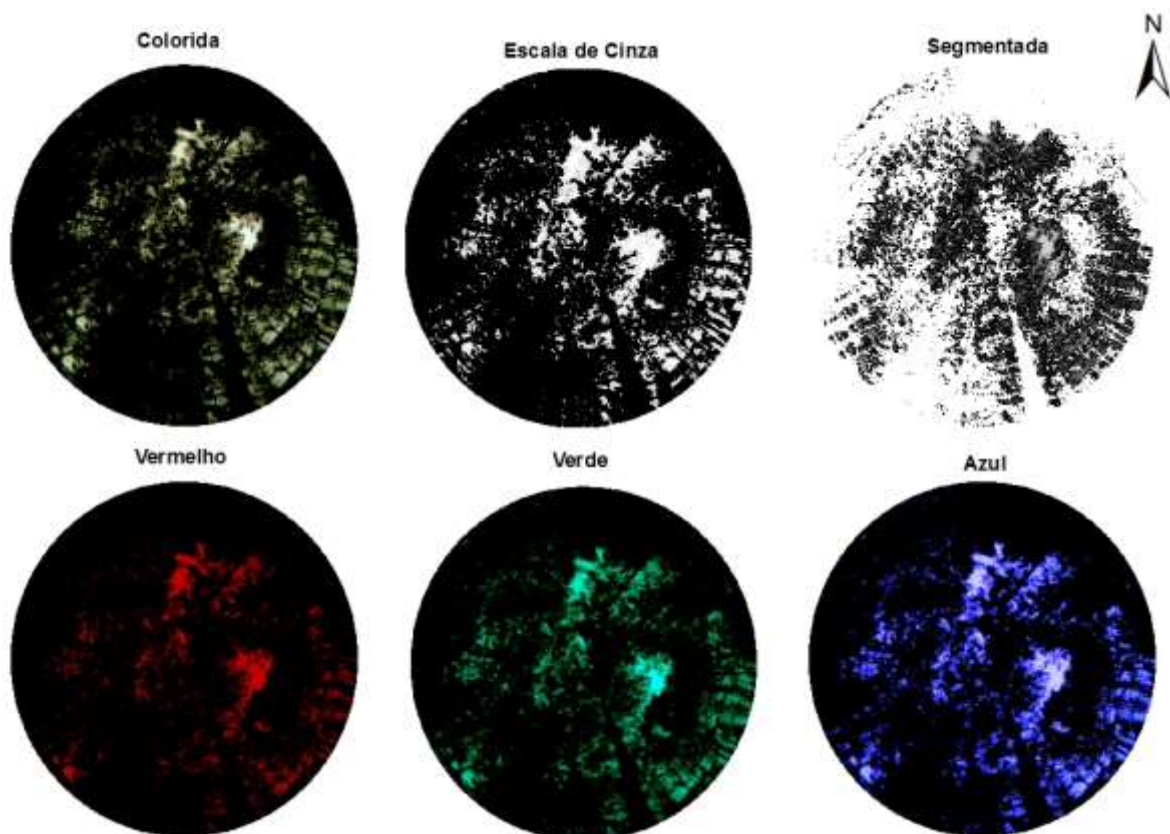


FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DE UMA FOTOGRAFIA HEMISFÉRICA DA ÁREA TOTAL, APRESENTANDO AS DIVERSAS FORMAS DE COMPOSIÇÃO
FONTE: Autora

A partir da interpretação visual não foi possível identificar as imagens que apresentaram os maiores valores do índice de área foliar. Logo, a separabilidade

espectral é considerada moderada, o que dificultou o processamento digital das imagens hemisféricas a partir de algoritmos classificadores paramétricos e não-paramétricos em softwares de processamento digital de imagens. Diante disso, é importante que sejam utilizados softwares específicos como o *Gap Light Analyzer* (GLA) e *Sidelook*, que possibilitam escurecer uma porção da vegetação que tenha sido registrado com coloração intermediária, tornando a imagem binária.

Quanto à análise do histograma, os canais RGB (*Red, Green e Blue*) foram observados individualmente, no intuito de caracterizar a variabilidade da vegetação em cada canal. Conforme pode ser visualizado na Figura 17, o canal verde foi o que apresentou maior variabilidade, apresentando uma maior distribuição no histograma. Em contrapartida, o canal azul foi o que apresentou uma menor dispersão, e consequentemente, menor variabilidade.

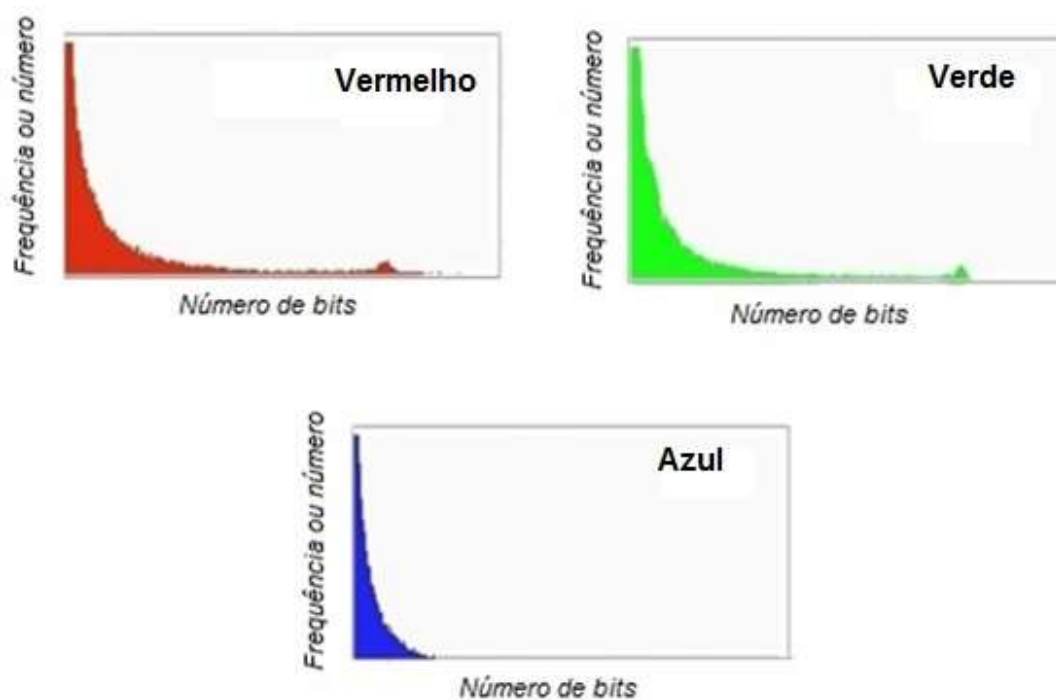


FIGURA 17 – HISTOGRAMA NOS CANAIS RGB DE FOTOGRAFIA HEMISFÉRICA REFERENTE À ÁREA TOTAL NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ
FONTE: Autora

O canal que apresenta menor variabilidade é considerado o mais confiável, pois, é o que foi menos atingido pela radiação difusa ou por pequenas

mudanças diárias, como horário de coleta e condições climáticas. Diante da análise do histograma de diversas amostras, o canal azul foi considerado como mais representativo da realidade, sendo capaz de apresentar um melhor contraste entre o céu e o dossel florestal.

O canal verde apresentou uma maior variabilidade devido a maior dispersão do histograma, o que caracteriza a influência externa sob os dados (radiação difusa ou interferências na coleta de dados). O canal vermelho foi considerado intermediário entre o canal azul e verde.

Para a descrição adequada da distribuição de frequências de uma variável é necessário analisar o quanto os valores variam, ou seja, quão dispersos estão, logo, se os valores estão pouco dispersos, a imagem mostra pouca variabilidade (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Meneses e Almeida (2012) consideram ainda, que o histograma pode ser usado em qualquer estudo para representar uma grande quantidade de dados numéricos, como meio para analisar as informações de forma mais simples do que por meio de tabulações. É possível obter informações que estão contidas na imagem, bem como a intensidade de contraste entre os alvos e a quantidade de classes que a imagem pode distinguir.

Brusa e Bunker (2014) testaram a confiabilidade dos histogramas em canais RGB de fotografias hemisféricas. Os melhores resultados foram no canal azul, devido aos níveis de luz azul na transmitância da atmosfera, e aos baixos níveis na reflectância das folhas. As imagens do canal verde apresentaram confusão entre o céu e o dossel florestal, apresentando uma maior distribuição no histograma e um menor contraste. Logo, os resultados encontrados pelo autor, assemelham-se aos apresentados neste estudo.

Uma forma de minimizar os erros de processamento seria utilizar a imagem no canal azul, pois é o que apresenta maior capacidade de separação entre os pixels referentes às classes céu e vegetação (ZHANG et al., 2005; GALVANI e LIMA, 2014).

A análise de histogramas em fotografias hemisféricas é considerada adequada para o cálculo do índice de área foliar, pois é sensível as condições

do céu, fácil de utilizar, requer menor armazenamento de dados e o processamento é rápido.

Na Figura 18 estão representados os valores máximos, médios e mínimos do índice de área foliar para as parcelas analisadas, a partir da imagem bruta (composição colorida). É possível perceber que as fotografias hemisféricas apresentam uma tonalidade escura, com pouco detalhamento e de difícil interpretação visual. A tonalidade escura também está atrelada a luminosidade e ao tipo de vegetação. Por tratar-se de um ambiente florestal em que existem poucas clareiras, apresentando um dossel fechado, a incidência da luminosidade influencia na qualidade da imagem gerada pelo equipamento CI-110.

As fotografias hemisféricas apresentaram alguns pontos fracos, como a subjetividade no processo de *thresholding*, e quanto à iluminação do fundo do céu em algumas imagens. Embora a coleta tenha sido realizada em condições de luminosidade adequadas, o grande número de amostras proporcionou uma grande variabilidade.

Segundo Zhang et al. (2005), um dos critérios para um bom processamento dessas imagens é o intervalo dos números digitais (ND), onde a folhagem aparece em preto ($ND=0$), e o fundo do céu aparece em branco ($ND=256$). Na prática, o céu da floresta deve se aproximar ao máximo do branco, e o dossel o mais escuro possível, de modo que exista um grande contraste entre os pixels do céu e das folhas.

Ao estimar o IAF da Floresta Ombrófila Mista, algumas imagens que apresentaram valores discrepantes em relação às demais amostras referentes ao mesmo ponto de coleta foram descartadas. Essas imagens foram consideradas impróprias para a análise, de modo que os erros se associam à sensibilidade da câmera olho-de-peixe quanto a radiação difusa.

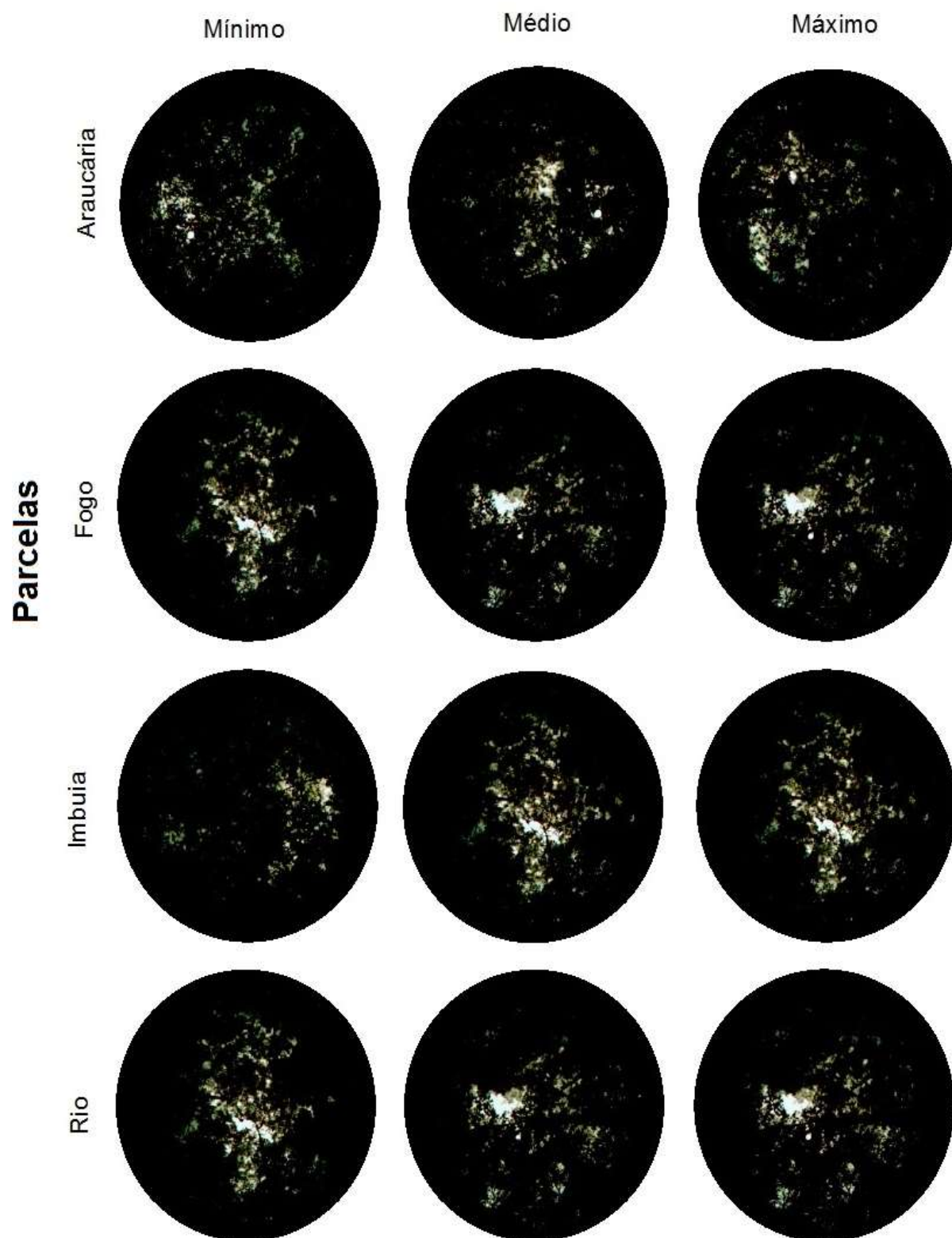


FIGURA 18 – FOTOGRAFIAS HEMISFÉRICAS DA ÁREA DE ESTUDO
FONTE: Autora

O valor do índice de área foliar para o fragmento de Floresta Ombrófila Mista obtido neste estudo variou de 6,01 até 8,01, conforme pode ser visualizado na Tabela 3.

TABELA 3 – ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR TERRESTRE ENCONTRADOS NA ÁREA DE ESTUDO

Índice de Área Foliar Terrestre							
	Local	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância	CV(%)
Parcela	Área total	6,94	8,01	7,63	0,27	0,07	3,56
	Araucária	6,1	7,91	7,01	0,46	0,21	6,64
	Fogo	6,23	7,85	7,01	0,45	0,20	6,79
	Imbuia	6,01	7,95	6,85	0,46	0,21	6,74
	Rio	6,22	7,56	6,69	0,33	0,11	5,07

Onde: CV (%) = coeficiente de variação

A parcela Rio e a Área total possuem desvio padrão menor que as demais parcelas. Esse fator pode estar relacionado ao número de unidades amostrais, considerando que as parcelas Araucária, Fogo e Imbuia tiveram 81 amostras coletadas, para Área total foram 33 e para a parcela Rio 36 amostras.

Para as parcelas Araucária e Fogo os valores médios do IAF são iguais, sendo de 7,01. Essas parcelas possuem como característica comum, o fato da intervenção antrópica ter sido diferenciado das demais. De acordo com Pizzato (1999) a intervenção antrópica na parcela Araucária criou condições para sua reconstituição, favorecendo a regeneração da espécie *Araucaria angustifolia*, de modo que, é possível identificar uma distância entre o dossel dessa espécie e o primeiro estrato das espécies folhosas. A Parcela Fogo foi afetada por incêndio há alguns anos atrás, e também é dominada pela *Araucaria angustifolia*, e apresenta um elevado número de espécies com aparecimento favorecido por distúrbios ambientais.

A diversidade de espécies influencia nos valores do IAF. Segundo Dalla Lana (2013) a parcela Araucária e Fogo no ano de 2011 apresentaram um número próximo de indivíduos. A Parcela Araucária apresentou 729 indivíduos distribuídos em 24 famílias botânicas e 32 gêneros. A Parcela Fogo apresentou 755 indivíduos, foram detectadas 23 famílias e 37 gêneros. Diante disso, esse

fator pode ter influenciado na semelhança entre os limites de classes e coeficiente de variação entre essas parcelas.

Estudo de Dalla Lana (2013) contabilizou 611 indivíduos na parcela Rio para o ano de 2011, pertencentes a 40 espécies. A parcela Imbuia apresentou 641 indivíduos distribuídos em 51 espécies, para este mesmo ano. Logo, é possível perceber que o número de indivíduos dessas duas parcelas é menor do que as demais, da mesma forma que o valor médio do IAF para ambas também foi menor, sendo de 6,69 e 6,85.

Além disso, a parcela Rio possui espécies peculiares de uma fase menos avançada de reconstituição da floresta primária, como *Capsicodendron dinisii* (Canellaceae), *Nectandra* sp. (Lauraceae), *Ilex paraguariensis* (Aquifoliaceae), *Sebatiana* sp. (Euphorbiaceae), entre outras. A parcela Imbuia é dominada por espécies folhosas de grande porte como *Ocotea porosa* (Lauraceae) e *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae), porém, esta área sofreu extração seletiva no passado (PIZZATO, 1999).

Embora a área de estudo possua 4 parcelas permanentes, e estas, tenham sido definidas em função de uma aparente diferença quanto ao estágio sucessional, tais parcelas englobam todos os tipos florestais da área de estudo, caracterizando a Floresta Ombrófila Mista. Logo, esse fator corrobora para que as unidades amostrais possuam uma amplitude alta, devido ao grande número de espécies, apresentando uma alta diversidade no local. Barreto (2015), ao realizar a análise da composição florística para o fragmento abordado neste estudo, identificou 734 ind.ha⁻¹ no total, distribuídos em 33 famílias e 80 espécies. De modo que, as famílias mais representativas foram de Lauraceae, Auracariaceae e Myrtaceae.

Estudo realizado por Dalla Lana (2013) descreve a estrutura horizontal da Estação Experimental Rudi Arno Seitz no ano de 2011, o qual pode ser visualizada nas Tabelas 4 e 5.

TABELA 4 - ESTRUTURA HORIZONTAL DE UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ NO ANO 2011

Nome científico	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	VC	VI
<i>Araucaria angustifolia</i>	160,90	20,58	20,14	48,30	71,40	15,30	34,40	28,10
<i>Nectandra grandiflora</i>	104,90	13,41	2,47	5,94	48,00	10,30	9,70	9,90
<i>Matayba elaeagnoides</i>	37,70	4,82	2,44	5,84	22,30	4,80	5,30	5,10
<i>Ilex paraguariensis</i>	48,00	6,14	0,87	2,09	24,60	5,30	4,10	4,50
<i>Ocotea porosa</i>	12,30	1,57	2,62	6,28	8,90	1,90	3,90	3,30
<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	30,30	3,87	0,43	1,04	18,60	4,00	2,50	3,00
<i>Cinnamomum vesiculosum</i>	28,30	3,62	0,71	1,70	16,30	3,50	2,70	2,90
<i>Campomanesia xanthocarpa</i>	22,90	2,92	0,94	2,26	15,10	3,20	2,60	2,80
NI	20,30	2,60	0,84	2,01	16,90	3,60	2,30	2,70
<i>Prunus brasiliensis</i>	21,70	2,78	0,72	1,72	14,60	3,10	2,30	2,50
<i>Capsicodendron dinisii</i>	20,00	2,56	0,97	2,31	12,30	2,60	2,40	2,50
<i>Casearia decandra</i>	19,40	2,49	0,46	1,11	15,40	3,30	1,80	2,30
<i>Ocotea puberula</i>	16,00	2,05	1,07	2,56	10,30	2,20	2,30	2,30
<i>Lithraea brasiliensis</i>	16,30	2,08	0,58	1,40	10,60	2,30	1,70	1,90
<i>Styrax leprosus</i>	17,10	2,19	0,53	1,26	8,60	1,80	1,70	1,80
<i>Myrsine ferruginea</i>	14,60	1,86	0,30	0,73	8,00	1,70	1,30	1,40
<i>Cedrela fissilis</i>	10,00	1,28	0,49	1,18	8,30	1,80	1,20	1,40
<i>Sebastiania brasiliensis</i>	12,30	1,57	0,21	0,51	7,40	1,60	1,00	1,20
<i>Cinnamomum sellowianum</i>	10,90	1,39	0,34	0,81	6,60	1,40	1,10	1,20
<i>Clethra scabra</i>	10,90	1,39	0,20	0,49	5,70	1,20	0,90	1,00
Myrtaceae	10,00	1,28	0,23	0,55	5,10	1,10	0,90	1,00
<i>Luehea divaricata</i>	4,30	0,55	0,58	1,40	4,00	0,90	1,00	0,90
<i>Eugenia uniflora</i>	10,30	1,32	0,13	0,31	5,40	1,20	0,80	0,90
<i>Cupania vernalis</i>	7,40	0,95	0,13	0,32	6,60	1,40	0,60	0,90
<i>Myrcia</i> sp.	9,10	1,17	0,14	0,34	4,90	1,00	0,80	0,80
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	7,10	0,91	0,14	0,35	5,40	1,20	0,60	0,80
<i>Jacaranda puberula</i>	6,30	0,80	0,19	0,46	5,10	1,10	0,60	0,80
<i>Sapium glandulatum</i>	6,00	0,77	0,12	0,30	6,00	1,30	0,50	0,80
<i>Syagrus romanzoffiana</i>	5,40	0,69	0,20	0,48	4,60	1,00	0,60	0,70
<i>Ilex theezans</i>	5,40	0,69	0,20	0,48	4,30	0,90	0,60	0,70
<i>Allophylus edulis</i>	5,10	0,66	0,11	0,27	5,10	1,10	0,50	0,70
<i>Sloanea lasiocoma</i>	3,70	0,48	0,33	0,79	3,10	0,70	0,60	0,60
<i>Machaerium stipitatum</i>	3,70	0,48	0,06	0,15	3,70	0,80	0,30	0,50
<i>Piptocarpha angustifolia</i>	3,10	0,40	0,15	0,35	2,90	0,60	0,40	0,50
<i>Gochnatia polymorpha</i>	3,70	0,48	0,09	0,21	3,10	0,70	0,30	0,50
<i>Hovenia dulcis</i>	3,10	0,40	0,13	0,31	2,90	0,60	0,40	0,40
<i>Ocotea</i> sp.	2,30	0,29	0,25	0,60	1,70	0,40	0,40	0,40
<i>Myrcia palustres</i>	3,70	0,48	0,07	0,17	2,60	0,60	0,30	0,40
<i>Campomanesia guazumifolia</i>	3,70	0,48	0,07	0,16	2,60	0,60	0,30	0,40
<i>Myrsine umbellata</i>	3,40	0,44	0,07	0,16	2,30	0,50	0,30	0,40
<i>Eugenia involucrata</i>	2,60	0,33	0,08	0,18	2,60	0,60	0,30	0,40
<i>Myrcia rostrata</i>	3,10	0,40	0,05	0,11	2,30	0,50	0,30	0,30
<i>Erythroxylum deciduum</i>	2,30	0,29	0,05	0,11	2,30	0,50	0,20	0,30
<i>Nectandra megapotamica</i>	1,70	0,22	0,14	0,33	1,40	0,30	0,30	0,30

Continua..

Onde: DA = Densidade absoluta (indivíduos/ha); DR = Densidade Relativa (%); DoA = Dominância Absoluta (m²/ha); DoR = Dominância Relativa (%); FA = Frequência Absoluta (%); FR = Frequência Relativa (%); VC = Valor de Cobertura (%) dividido por 2; VI = Valor de Importância (%) dividido por 3.

TABELA 5 – (CONTINUAÇÃO) ESTRUTURA HORIZONTAL DE UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ NO ANO 201

Nome científico	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	VC	VI
<i>Drimys brasiliensis</i>	2,30	0,29	0,03	0,08	2,00	0,40	0,20	0,30
<i>Vernonia discolor</i>	2,30	0,29	0,06	0,13	1,70	0,40	0,20	0,30
<i>Schinus terebinthifolius</i>	2,00	0,26	0,02	0,05	2,00	0,40	0,20	0,20
<i>Nectandra</i> sp.	1,70	0,22	0,05	0,13	1,70	0,40	0,20	0,20
<i>Zanthoxylum kleinii</i>	1,70	0,22	0,04	0,09	1,70	0,40	0,20	0,20
<i>Calyptanthus</i> sp.	1,70	0,22	0,03	0,07	1,70	0,40	0,10	0,20
<i>Persea major</i>	1,70	0,22	0,03	0,07	1,70	0,40	0,10	0,20
<i>Solanum sanctaecatharinae</i>	1,40	0,18	0,04	0,08	1,40	0,30	0,10	0,20
<i>Symplocos</i> sp.	1,10	0,15	0,06	0,14	1,10	0,20	0,10	0,20
<i>Ilex brevicaulis</i>	1,70	0,22	0,02	0,05	1,10	0,20	0,10	0,20
<i>Piptocarpha axillaris</i>	1,10	0,15	0,04	0,08	1,10	0,20	0,10	0,20
<i>Lithraea molleoides</i>	1,40	0,18	0,02	0,04	1,10	0,20	0,10	0,20
<i>Ilex dumosa</i>	1,10	0,15	0,02	0,05	1,10	0,20	0,10	0,10
<i>Annona</i> sp.	1,10	0,15	0,02	0,04	1,10	0,20	0,10	0,10
<i>Casearia obliqua</i>	1,10	0,15	0,01	0,03	1,10	0,20	0,10	0,10
<i>Symplocos celastrina</i>	1,10	0,15	0,03	0,07	0,90	0,20	0,10	0,10
<i>Maytenus ilicifolia</i>	1,10	0,15	0,01	0,03	0,90	0,20	0,10	0,10
<i>Allophylus guaraniticus</i>	0,90	0,11	0,01	0,03	0,90	0,20	0,10	0,10
<i>Psidium</i> sp.	0,60	0,07	0,02	0,06	0,60	0,10	0,10	0,10
<i>Vitex megapotamica</i>	0,60	0,07	0,02	0,05	0,60	0,10	0,10	0,10
<i>Xylosma pseudosalzmannii</i>	0,60	0,07	0,01	0,02	0,60	0,10	0,00	0,10
<i>Lonchocarpus</i> sp.	0,60	0,07	0,02	0,05	0,30	0,10	0,10	0,10
<i>Mimosa scabrella</i>	0,30	0,04	0,03	0,06	0,30	0,10	0,00	0,10
<i>Inga</i> sp.	0,30	0,04	0,02	0,05	0,30	0,10	0,00	0,00
<i>Solanum erianthum</i>	0,30	0,04	0,00	0,01	0,30	0,10	0,00	0,00
<i>Ocotea pulchella</i>	0,30	0,04	0,00	0,01	0,30	0,10	0,00	0,00
TOTAL	781,70	100,00	41,70	100,00	467,40	100,00	100,00	100,00

Onde: DA = Densidade absoluta (indivíduos/ha); DR = Densidade Relativa (%); DoA = Dominância Absoluta (m²/ha); DoR = Dominância Relativa (%); FA = Frequência Absoluta (%); FR = Frequência Relativa (%); VC = Valor de Cobertura (%) dividido por 2; VI = Valor de Importância (%) dividido por 3.

O coeficiente de variação do IAF entre as parcelas variou de 3,56 a 6,79, espera-se que o índice de vegetação com maior potencial para descrever o índice de área foliar através do método orbital possua comportamento semelhante.

O valor do índice de área foliar para florestas, conforme apresenta a literatura, varia de 0,40 para uma baixa densidade de indivíduos e 16,9 para povoamentos antigos. Os maiores valores relatados são para coníferas, com valores máximos entre 6 e 8, para florestas decíduas (JONCKHEERE et al., 2004).

Valores extremamente elevados de até 41,8 foram identificados em florestas de coníferas boreal, porém, alguns autores acreditam que foram realizadas simplificações inadequadas quanto a medição em grande escala (JONCKHEERE et al., 2004).

Schulze (1982) considera que o índice de área foliar para a maioria dos biomas (com exceção do deserto) varia de 3 a 19, apresentando os valores mais altos em florestas de coníferas boreais. Em floresta de transição Amazônia Cerrado o índice de área foliar gerado através de fotografias hemisféricas variou de 0,52 a 4,12 (SANCHES et al., 2008).

Estudo realizado por Asner et al. (2003) apresentou uma síntese de estimativas do índice de área foliar, sendo mais de 1.000 medições publicadas, e 400 obtidas a campo. Os valores médios de IAF por biomas diminuíram significativamente da década de 90 até os dias atuais, fator que pode estar atrelado ao avanço das tecnologias e equipamentos de medições indireta.

De acordo com Cescatti (2007) a disponibilidade de dados precisos e de alta resolução proporciona novas perspectivas para a aplicação de fotografias hemisféricas na análise do regime radiativo da copa das plantas.

Estimativas do índice de área foliar obtidas através de métodos indiretos são significativamente correlacionadas com o IAF obtido a partir de métodos diretos. Porém, quando se analisa o IAF oriundo de forma direta e óptico, ocorrem mudanças devido a influências sazonais variáveis, de modo que, quando pretende avaliar tal correlação, os dados deverão ser coletados na mesma época do ano (LIU et al., 2015).

Giglio (2013) caracterizou o índice de cobertura do dossel para Floresta Ombrófila Mista (FOM) durante o período de um ano, e identificou que a vegetação inicia o ano (verão) com a cobertura em seu valor máximo, atingindo seu menor índice no inverno e voltando a desenvolver-se na primavera. Logo, o valor elevado do IAF para as unidades amostrais em São João do Triunfo, pode estar relacionado à época de coleta dos dados, realizada no verão.

4.2 ESTIMATIVA DO IAF PELO MÉTODO DE IMAGEAMENTO ORBITAL

4.2.1 Índices de vegetação

Os valores dos índices de vegetação gerados a partir da imagem Pléiades encontrados na Estação experimental Rudi Arno Seitz, estão descritos na Tabela 6.

TABELA 6 – INTERVALOS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO GERADOS A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES

Índice de vegetação	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Amplitude	CV (%)
Área total						
NDVI	0,824	0,981	0,898	0,029	0,157	3,250
EVI	0,330	0,854	0,540	0,124	0,524	22,979
SAVI	0,340	0,674	0,481	0,081	0,340	16,853
SR	4,000	8,000	5,812	0,895	5,000	15,427
Parcela Araucária						
NDVI	0,854	0,934	0,892	0,016	0,080	1,797
EVI	0,380	0,800	0,506	0,076	0,420	15,157
SAVI	0,367	0,640	0,460	0,049	0,273	10,841
SR	4,000	9,000	5,506	0,760	5,000	13,840
Parcela Fogo						
NDVI	0,833	0,971	0,897	0,021	0,138	2,419
EVI	0,256	0,879	0,536	0,111	0,623	20,688
SAVI	0,270	0,687	0,480	0,074	0,417	15,424
SR	4,000	9,000	5,901	1,019	5,000	17,282
Parcela Imbuia						
NDVI	0,618	0,985	0,893	0,046	0,367	5,156
EVI	0,281	0,893	0,528	0,124	0,702	17,750
SAVI	0,294	0,705	0,477	0,084	0,411	23,526
SR	3,000	9,000	5,839	1,219	6,000	20,878
Parcela Rio						
NDVI	0,868	0,918	0,890	0,013	0,050	1,460
EVI	0,355	0,658	0,484	0,071	0,303	14,669
SAVI	0,349	0,564	0,444	0,049	0,215	11,036
SR	4,000	7,000	5,222	0,590	3,000	11,302

Fonte: Autora

O NDVI apresentou valor médio de 0,89 para todas as parcelas, o que caracteriza a homogeneidade desse índice em todas as unidades amostrais. Além disso, foi o índice que apresentou o menor coeficiente de variação e amplitude, caracterizando uma pequena variabilidade do índice para a área de estudo, de modo que, não foi possível representar as diferenças das fisionomias

vegetais do local, considerando a área como homogênea. O coeficiente de variação foi considerado baixo, o que indica baixa dispersão dos valores do NDVI em torno da média geral de 0,89.

Embora diversos estudos tenham demonstrado a funcionalidade do NDVI na estimativa de propriedades da vegetação, muitas influências atmosféricas e da própria vegetação restringem o seu uso de forma global. Logo, os índices melhorados, como é o caso do EVI e do SAVI, incorporam um fator de ajuste para os solos ou para as condições atmosféricas, gerando subprodutos que possuem uma maior confiabilidade relacionada à verdade de campo.

O EVI foi o índice de vegetação que apresentou os maiores valores do coeficiente de variação, variando de 14,669 a 22,979%. Os índices de vegetação SAVI e SR apresentaram valores do coeficiente de variação muito próximos, porém, o SAVI e o EVI se equiparam quanto aos limites de classe. Diante disso, é possível evidenciar que o EVI se mostrou mais sensível as variações na cobertura vegetal da área de estudo.

Cassol (2013) ao estimar os índices de vegetação para Estação Experimental Rudi Arno Seitz obteve os menores valores do coeficiente de variação para o NDVI, sendo de 0,74% para o sensor Aster, 2,83% para o sensor LISS III e 1,26% para o sensor TM. Os valores do coeficiente de variação para o EVI variaram de 6,27 a 12,85%, e para o SAVI os valores foram entre 5,62 e 11,35%. O índice de razão simples apresentou valores superiores aos demais, variando de 7,63 a 51,52%.

Para melhor visualizar a estatística descritiva já apresentada na Tabela 4, foram gerados os histogramas de cada índice de vegetação, conforme pode ser visualizado na Figura 19. Os valores apresentados no histograma referem-se a toda área de abrangência da Estação Experimental Rudi Arno Seitz, de modo que, esses valores possuem uma amplitude maior do que as unidades amostrais apresentadas no estudo, onde se utilizou como referência o valor do *pixel* de cada ponto de coleta. Além disso, a maior variabilidade de dados apresentadas nos histogramas pode estar atrelada às trilhas existentes entre as parcelas do PELD e ao alojamento disponibilizado aos estudantes.

No histograma é possível visualizar que o EVI é o índice que apresenta uma melhor distribuição dos níveis de cinza, de modo que, essa característica é fundamental para obter uma boa separabilidade entre os alvos. Meneses e Almeida (2012) considera que para se descrever adequadamente a distribuição de frequências em histogramas é necessário analisar o quanto esses valores variam (variabilidade), ou seja, quão dispersos estão. Logo, se os valores estão concentrados, a imagem mostra pouca variabilidade, o que é notável no histograma do NDVI, o que reitera a informação apresentada na estatística descritiva.

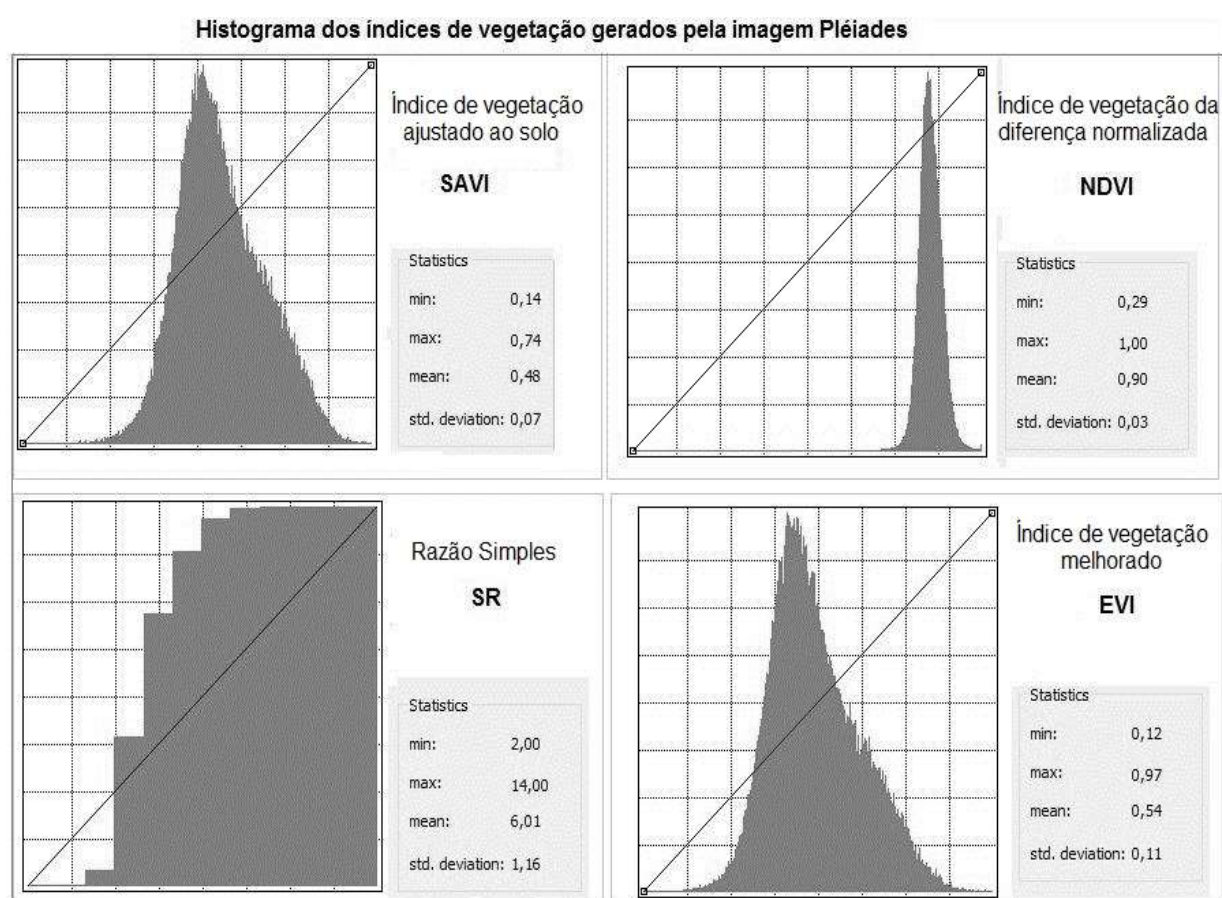


FIGURA 19 – HISTOGRAMA DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO GERADOS PELA IMAGEM PLÉIADES, PARA TODA A ÁREA DE ESTUDO
Fonte: Autora

Além disso, percebe-se que os histogramas do EVI e do SAVI apresentaram comportamento semelhante. Ambos exibem uma distribuição normal de frequência e são unimodais, de modo que, quase todos os *pixels* oscilam em torno da média. Logo, evidencia-se que as imagens do SAVI e do

EVI apresentam uma distribuição de tons de cinza mais equilibrada em relação à média, e ainda, a maior abertura do histograma indica uma variância mais alta, ou seja, a imagem apresenta um maior contraste, contendo um número maior de informações.

O histograma do índice de vegetação de razão simples apresenta forma assimétrica, de modo que, a parte mais à direita representa alvos de alto contraste espectral, tornando a imagem escura.

Não existe um índice de vegetação que seja considerado universal para estimar o índice de área foliar em todos os tipos de cobertura vegetal. O uso dos índices de vegetação é considerado de fácil aplicabilidade, e pode ser aplicado em análises de nível local e global. Em alguns casos é difícil diferenciar as fisionomias vegetais em função da proximidade da resposta espectral do *pixel*.

Quanto maior o IAF de um dossel menor sua reflectância na região do visível e maior no Infravermelho próximo (IVP). Porém, essa dinâmica não é linear e haverá um valor de IAF acima do qual não mais se observará alteração nos valores de reflectância do dossel, tanto para o visível (ao assumir seu valor mínimo), quanto para o infravermelho próximo (ao assumir seu valor máximo). Esses valores são denominados pontos de saturação e tendem a serem maiores no IVP e menores no visível.

4.2.1.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) gerado através da imagem Pléiades assumiu valores entre 0,289 e 1 para a área experimental Rudi Arno Seitz. Na Figura 20 é possível visualizar a distribuição espacial do NDVI na área de estudo.

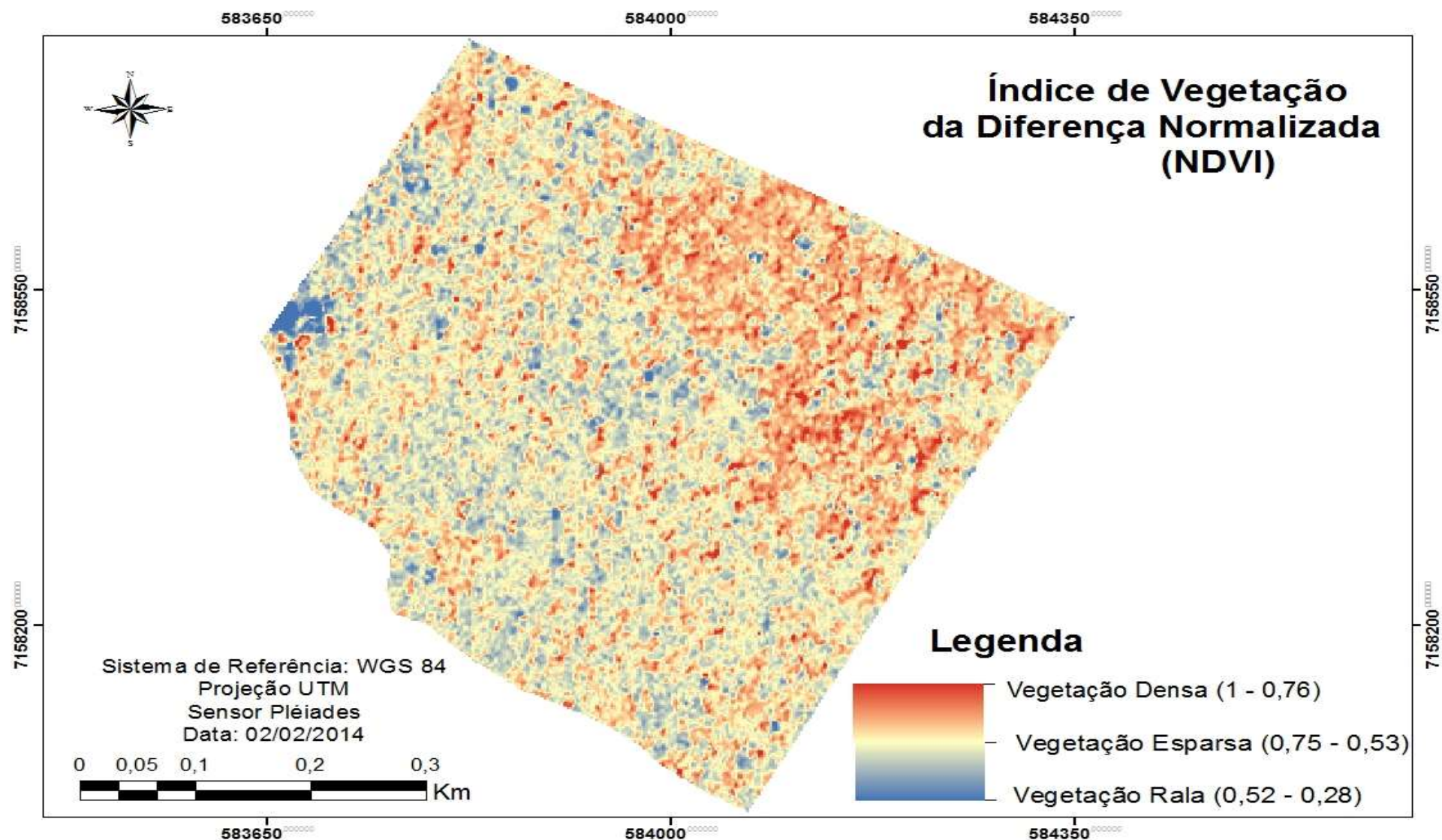


FIGURA 20 – MAPA TEMÁTICO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI GERADO A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES, PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ

Percebe-se que apesar das unidades amostrais analisadas apresentarem valores muito próximos, tendo uma amplitude baixa, a partir da detecção visual é possível identificar valores muito baixos em alguns *pixels*, e ainda, uma grande contribuição das classes intermediárias. Os maiores valores de NDVI, ou seja, aqueles que estão mais próximos de 1, indicam as áreas com maior vigor vegetativo, correspondendo aos Números Digitais (ND) mais elevados. Logo, os valores mais baixos, correspondem a áreas com vegetação menos densa, com pouco vigor vegetativo ou apresentando estresse hídrico.

O NDVI é o índice de vegetação mais utilizado e intensamente estudado e está disponível gratuitamente regionalmente ou globalmente a partir de uma série de projetos de sensoriamento remoto, como por exemplo, os dados AVHR e MODIS.

De acordo com Jensen (2009), o NDVI é altamente correlacionado com o índice de área foliar, porém essa relação pode não ser tão forte em períodos onde o IAF apresenta valores altos, aparentemente devido à saturação do NDVI. E ainda, em casos que a biomassa é alta, como em florestas, o intervalo do NDVI é pouco expressivo, ou seja, o índice estabiliza em um patamar, apresentando um mesmo valor, embora possua um aumento na densidade do dossel. Para pastagens, biomas áridos e semi-áridos, a biomassa é considerada baixa, de modo que o NDVI é capaz de estimar o IAF com maior precisão.

De acordo com Rodrigues et al. (2013) o NDVI apresenta uma saturação rápida nos valores a partir de 0,875, o que o torna pouco sensível a detecção de variações na biomassa vegetal.

Amaral et al. (1996) analisaram diferentes estágios de crescimento secundário na Floresta Amazônica concluiu que o NDVI e parâmetros estruturais da vegetação, como biomassa e índice de área foliar, estão melhor associadas as áreas de menor sucessão, onde encontra-se os menores valores de biomassa.

Breunig et al. (2011) estimaram o IAF de soja através de um modelo de transferência radiativa baseado no NDVI, utilizando imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). A maior amplitude encontrada no NDVI foi no período de cultivo, e as menores variações ocorreram quando a cultura já estava desenvolvida.

Além disso, os resultados de Breunig et al. (2011) obtidos a nível orbital confirmaram os dados obtidos a campo no experimento de Epiphanyo e Huete (1995), que indica que o NDVI foi mais representativo em copas esparsas e diminuiu com o aumento do índice de área foliar.

O NDVI e as técnicas de Sensoriamento Remoto têm sido muito utilizados em países como a Argentina, onde a economia depende fortemente da agricultura, pois permite estimar o rendimento da cultura com antecedência, sendo um requisito para gerar orçamento nacional, planejar estratégias públicas devido a desastres nacionais e antecipar a demanda por transporte e armazenamento. O trigo, cultura importante na Argentina, apresenta um período crítico, onde existe um valor máximo de área foliar e alguns fatores como plantas daninhas e competição passam a interferir diretamente na produção. Diante disso, a Argentina, com base na experiência do Ministério da Agricultura do Marrocos, tem estimado o rendimento do trigo por meio do NDVI, obtendo um melhor rendimento da cultura (LOPRESTI et al., 2015).

Estudos realizados na Mongólia têm estimado a degradação de terras e regeneração natural, a partir das mudanças na radiação fotossinteticamente ativa e do vigor vegetativo estimado através do índice de vegetação NDVI (ECKERT et al., 2015).

4.2.1.2 Razão Simples (RS)

O índice de vegetação de razão simples apresentou valores de 1 a 11 dispersos em toda a Estação Experimental estudada. Ao compará-lo com os demais índices é possível identificar uma frequência maior nas classes inferiores e superiores, caracterizadas pelas tonalidades azul e vermelha no mapa temático (Figura 21).

Em áreas florestais a quantidade refletida de radiação eletromagnética referente à região do vermelho se aproxima de valores muito baixos, de modo que, o índice de vegetação de razão simples aumenta, sem limite, divergindo dos demais índices.

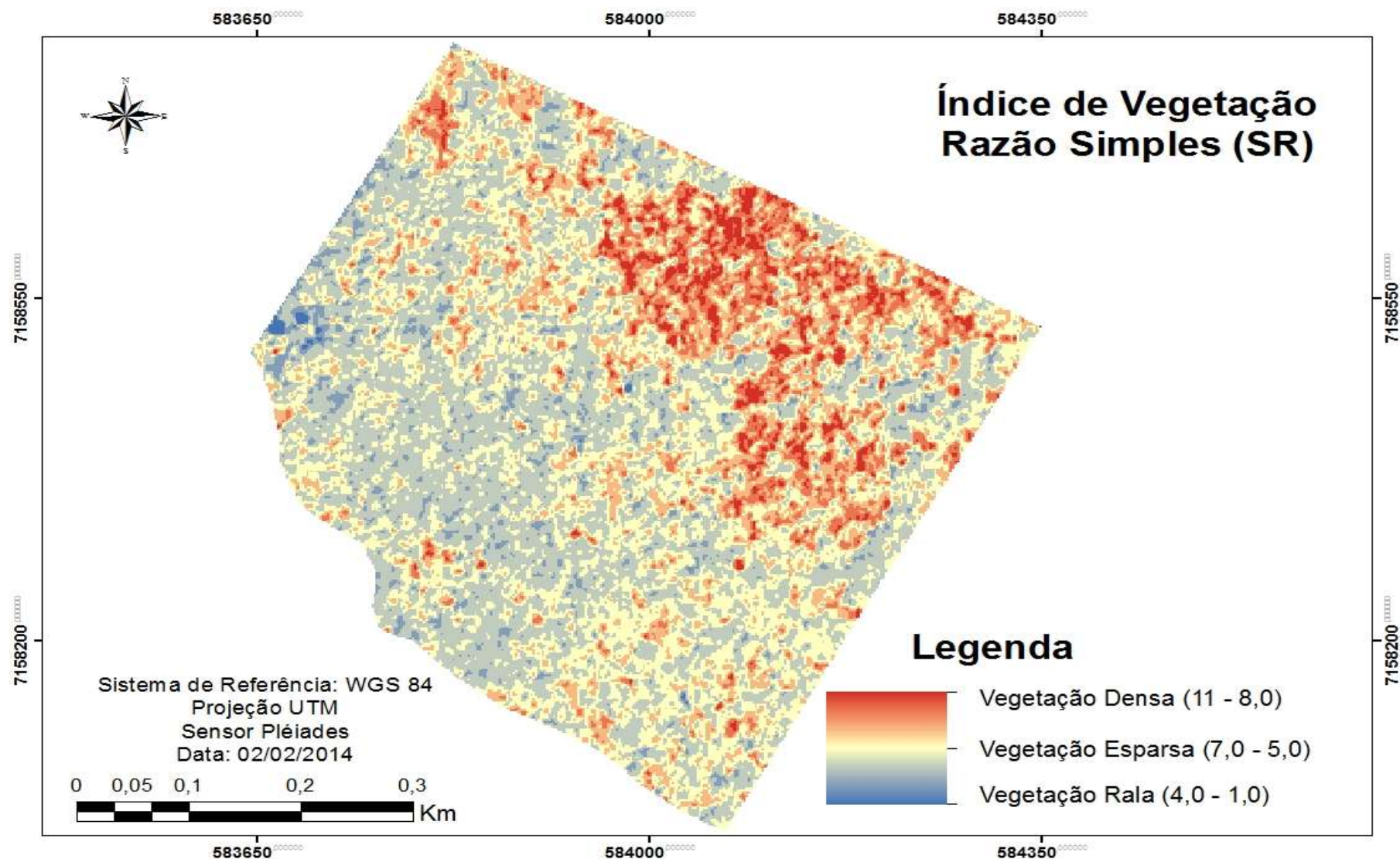


FIGURA 21 – MAPA TEMÁTICO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO SR GERADO A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES, PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ

Diversos autores consideram que o SR não é capaz de caracterizar a cobertura vegetal, pois possui um coeficiente de variação elevado, possivelmente em função da sua formulação (CRUZ et al., 2011).

Accioly et al. (2002) aplicaram transformações espectrais como os índices de vegetação e a fração de vegetação obtida pelo modelo de análise de misturas em dados do sensor TM/LANDSAT, com o objetivo de se estimar parâmetros estruturais da Floresta Nacional do Araripe, no Ceará. As melhores relações entre as variáveis estruturais e espectrais foram encontradas para o índice de razão simples. Os autores consideram que não ocorreu a saturação desse índice, diferente dos demais índices que foram testados.

Cassol et al. (2013) testaram os índices de vegetação NDVI, TVI, SAVI e SR para estimar biomassa na Estação Experimental Rudi Arno Seitz a partir de imagens do sensor ASTER, obteve resultados satisfatórios em todos os índices, com exceção do SR.

4.2.1.3 Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

Ao comparar o EVI com o SAVI e o NDVI percebe-se que existe uma grande variabilidade nos dados, apresentando valores de 0,12 a 0,96 distribuídos em toda a Estação Experimental Rudi Arno Seitz. Quanto as unidades amostrais analisadas, obteve-se valores de 0,256 a 0,879. Na Figura 22 é possível visualizar a distribuição espacial do EVI.

O EVI é um índice que apresenta um fator de ajuste para solos e dois coeficientes que descrevem o uso da banda azul para correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis (JENSEN, 2009).

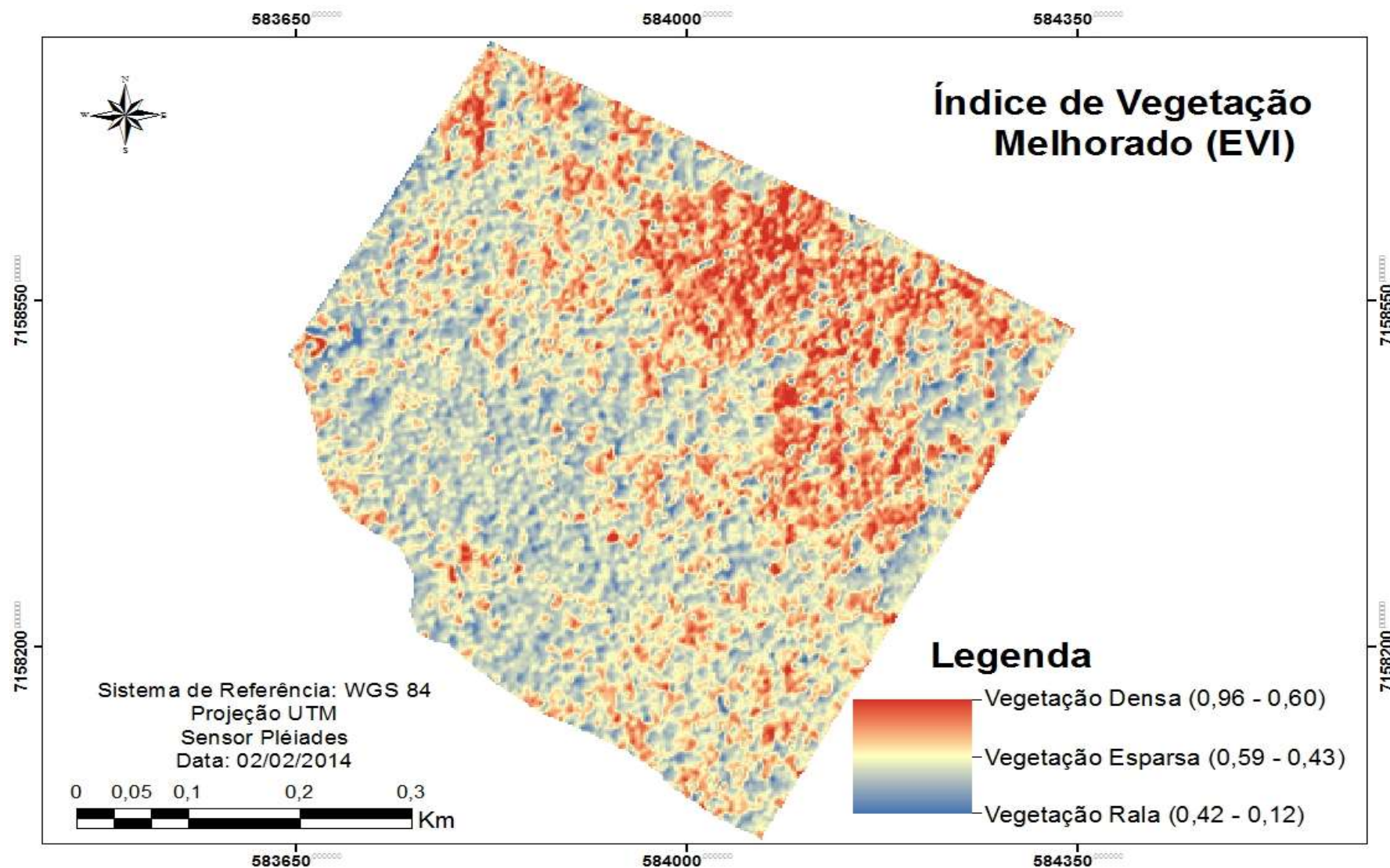


FIGURA 22 – MAPA TEMÁTICO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO EVI GERADO A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ

O EVI está sendo bastante utilizado em estudos de monitoramento da vegetação, pois tem apresentado resultados melhores do que os gerados por razão simples entre bandas, como o SR e o NDVI.

Moura (2009) realizou uma comparação quanto a sensibilidade dos índices de vegetação EVI e NDVI para representar as variações sazonais em diferentes fisionomias vegetais. O EVI apresentou maior correlação com a evapotranspiração, principalmente para as classes agricultura e pasto, devido a maior sensibilidade por parte dessas fisionomias às variações hídricas. As classes capoeira e reflorestamento apresentaram correlações moderadas, possivelmente pela menor dependência das variações hídricas. Logo, verificou-se que o EVI apresentou uma maior eficácia na avaliação das fisionomias vegetais quanto a influência do balanço hídrico.

O NDVI é considerado mais sensível a clorofila, enquanto o EVI é mais sensível quanto as variações na estrutura do dossel, bem como índice de área foliar, fisionomia da planta e arquitetura do dossel (ROSENDO, 2005).

4.2.1.4 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)

A distribuição espacial do SAVI na Estação experimental Rudi Arno Seitz está caracterizada na Figura 23. Logo, é possível evidenciar que o índice foi capaz de representar a cobertura vegetal, principalmente em comparação ao NDVI. Além disso, percebe-se a ausência de valores negativos, pois os valores variam em escala negativo-positivo, de modo que, em áreas com presença de vegetação o índice é positivo, e em áreas onde não há vegetação e exista corpos d'água, ou até mesmo nuvens, esse valor é negativo.

O SAVI é um índice de vegetação híbrido, pois possui um fator de ajuste, que tem como objetivo minimizar a presença do solo em meio a vegetação. Esse índice mede ou aproxima a distância entre o pixel e a linha do solo, amenizando os efeitos de *background* do solo (HUETE, 1988; POLONIO, 2015).

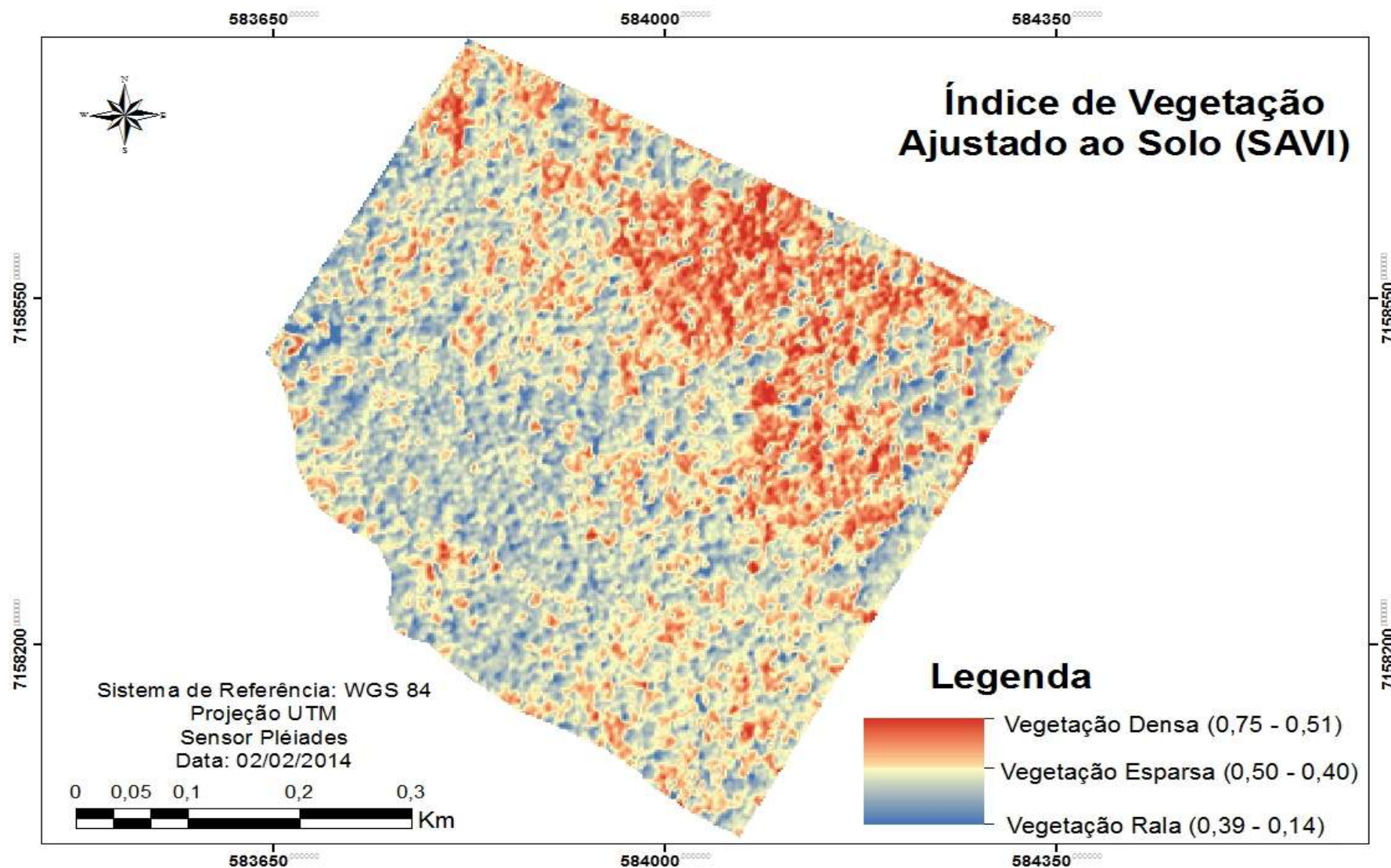


FIGURA 23 – MAPA TEMÁTICO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO SAVI GERADO A PARTIR DA IMAGEM PLÉIADES PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL RUDI ARNO SEITZ

Alguns autores consideram que o índice SAVI é limitado em função dos diferentes biomas e situações agrícolas, uma vez que os valores da constante são generalizados, não contemplando as especificidades dos ambientes analisados, mas apenas a densidade vegetada.

Watzlawick et al. (2009) geraram os índices de vegetação NDVI, SR e SAVI para um fragmento de Floresta Ombrófila Mista para estimar biomassa. O SAVI foi o que apresentou melhor correlação com os dados de campo.

Hentz et al. (2014) utilizaram imagens Landsat 8 para estimar biomassa a partir dos índices de vegetação NDVI, EVI e SAVI na Estação Experimental Rudi Arno Seitz. Assim como Watzlawick et al. (2009) o SAVI foi o índice que apresentou maior variação quanto as escalas e maior correlação.

Cassol (2013) estimou biomassa a partir dos índices de vegetação para a Estação Experimental Rudi Arno Seitz, e obteve para o EVI um valor médio de 0,81 no sensor ASTER, 0,40 no sensor LISS III e 0,66 no sensor TM. O NDVI apresentou valor médio de 0,94 para o sensor ASTER, 0,69 para o sensor LISS III e 0,96 para o TM. Logo, os valores encontrados por Cassol (2013) estão muito próximos do estimado pela imagem Pléiades.

Liang et al. (2015) utilizaram uma imagem orbital com alta resolução espacial para estimar valores de índice de área foliar de culturas agrícolas, usando dados espectrais simulados do dossel, a partir da geração de 43 índices de vegetação.

A interpretação dos índices de vegetação requer alguns cuidados, pois tudo que estiver influenciando a reflectância do dossel estará interferindo também no cálculo dos índices (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

4.2.2 Índice de Área Foliar (IAF)

Após a geração dos índices de vegetação, foram testados dois modelos de estimativa do índice de área foliar a partir da imagem orbital. Sendo o primeiro proposto por Duchemin et al. (2006), gerado a partir do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). E o segundo baseado no manual de formação

avançada em algoritmos de balanço energético da superfície terrestre (SEBAL, 2002), onde se considera o índice de vegetação SAVI. Na Tabela 7 é possível visualizar os valores de IAF para os modelos testados.

O modelo proposto por Duchemin et al. (2006) apresentou os menores valores do coeficiente de variação, exibindo valores de 5,60 a 16,99%, enquanto no proposto por SEBAL (2002) o coeficiente de variação variou de 15,50 a 35,76%. Logo, o modelo proposto por SEBAL (2002) possui uma dispersão de média a alta.

Tabela 7 – IAF GERADO PELOS MODELOS DUCHEMIN et al. (2006) E SEBAL (2002)

Modelo proposto por Duchemin et al. (2006)						
	Local	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Parcela	Área total	3,21	7,37	4,34	0,71	16,37
	Araucária	3,57	5,04	4,15	0,29	6,98
	Fogo	3,31	6,62	4,27	0,48	11,39
	Imbuia	1,78	7,84	4,28	0,72	16,99
	Rio	3,75	4,65	4,11	0,23	5,60
Modelo proposto por SEBAL (2002)						
Parcela	Área total	1,95	7,80	3,14	1,12	35,76
	Araucária	2,10	5,61	2,80	0,52	18,85
	Fogo	1,61	6,37	3,00	0,77	25,93
	Imbuia	1,00	8,43	3,02	1,01	33,64
	Rio	2,00	3,86	2,65	0,41	15,50

Fonte: Autora

O valor médio do IAF gerado pelo modelo de Duchemin et al. (2006) foi bastante homogêneo, onde as parcelas variaram de 4,11 a 4,34. O modelo proposto por SEBAL (2002) apresenta uma maior variação entre as parcelas, apresentando valores entre 2,65 a 3,14. Logo, esse padrão já era esperado, tendo em vista que os modelos são subprodutos dos índices de vegetação SAVI e NDVI, apresentando desempenho semelhante.

Na Figura 24 é possível visualizar os dois modelos de índice de área foliar gerados a partir dos índices de vegetação NDVI e SAVI.

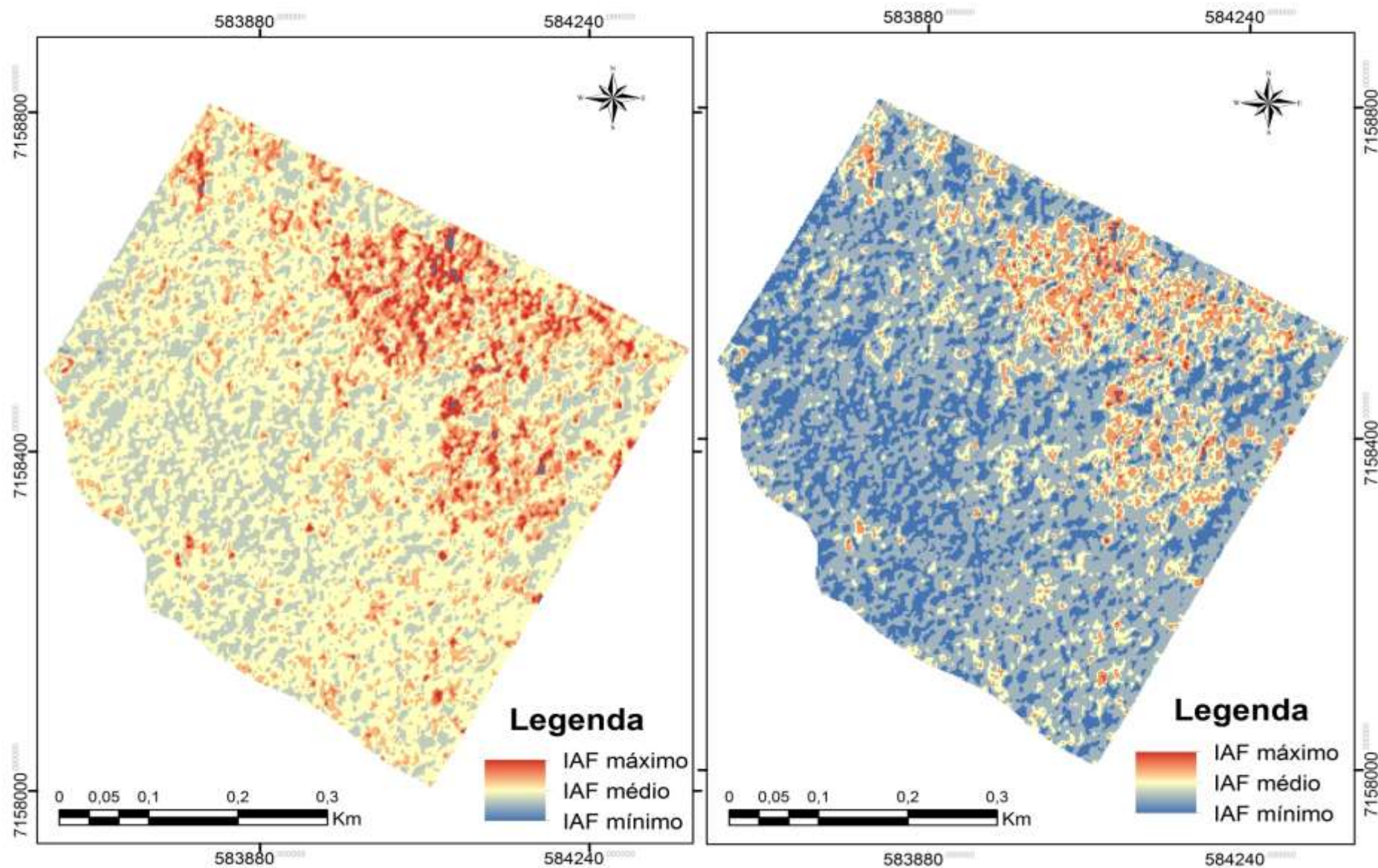


FIGURA 24 – ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR GERADO PELOS MODELOS DUCHEMIN et al. (2006) E SEBAL (2002)

A partir da análise dos modelos gerados, observa-se que os maiores e os menores valores correspondem aos mesmos alvos observados nos índices de vegetação, ainda que apresentem pequenas diferenças nos dados. Percebe-se que ambos os modelos apresentaram uma subestimativa em relação aos valores obtidos a partir do equipamento CI-110, sendo considerado como verdade de campo. Os valores do IAF estimado pelo modelo Duchemin et al. (2006) são os que mais equiparam-se aos valores obtidos a campo, porém é necessário analisar a correlação entre esses dados.

Na análise visual da Figura 24 é perceptível que no modelo proposto por Duchemin et al. (2006) os valores das classes superiores são mais representativos, de modo que, estão representados pela tonalidade amarela e vermelha, sendo predominante no mapa temático. Esses valores são mais próximos dos obtidos a campo, mesmo que ainda ocorra uma subestimativa. O modelo proposto por SEBAL (2002) está caracterizado com valores inferiores, de modo que, estes estão representados pela cor azul no mapa temático. Logo, os dados obtidos a partir do sensor terrestres foram correlacionados com o IAF gerado através dos modelos de SEBAL (2002) e Duchemin et al. (2006), no intuito de validar a aplicabilidade do modelo.

Assim como no IAF estimado através do equipamento CI-110, os valores do IAF gerados pelo método orbital também apresentaram uma grande variabilidade entre as parcelas. Esse fator pode estar atrelado aos diferentes dosséis florestais predominantes na Estação Rudi Arno Seitz. Estudo realizado por Cassol (2013) representou essas variações, onde se classificam como área com predominância de folhosas no dossel, área mista com *Araucaria angustifolia* e folhosas no dossel, e ainda, área com predominância de Araucária no dossel.

Ao comparar a Figura 25, com os modelos gerados para a estimativa do IAF (Figura 24) percebe-se que é possível identificar diferentes dosséis nesses modelos, de modo que, os *pixels* que apresentam os maiores valores do IAF no mapa dos modelos correspondem à área com predominância de folhosas. Além disso, a parcela que apresentou o valor máximo do IAF foi a Imbuia, pertencente à classe de folhosas.

Ainda existe uma carência de estudos sobre o comportamento espectral de florestas. Diante disso, destaca-se a importância de serem testados diversos modelos de estimativa do IAF, como os aqui apresentados, pois os índices de vegetação se comportam de maneira diferente conforme o tipo de cobertura vegetal. Os modelos SEBAL (2002) e Duchemin et al. (2006) têm sido bastante utilizados, porém, a literatura não faz referência a Floresta Ombrófila Mista.

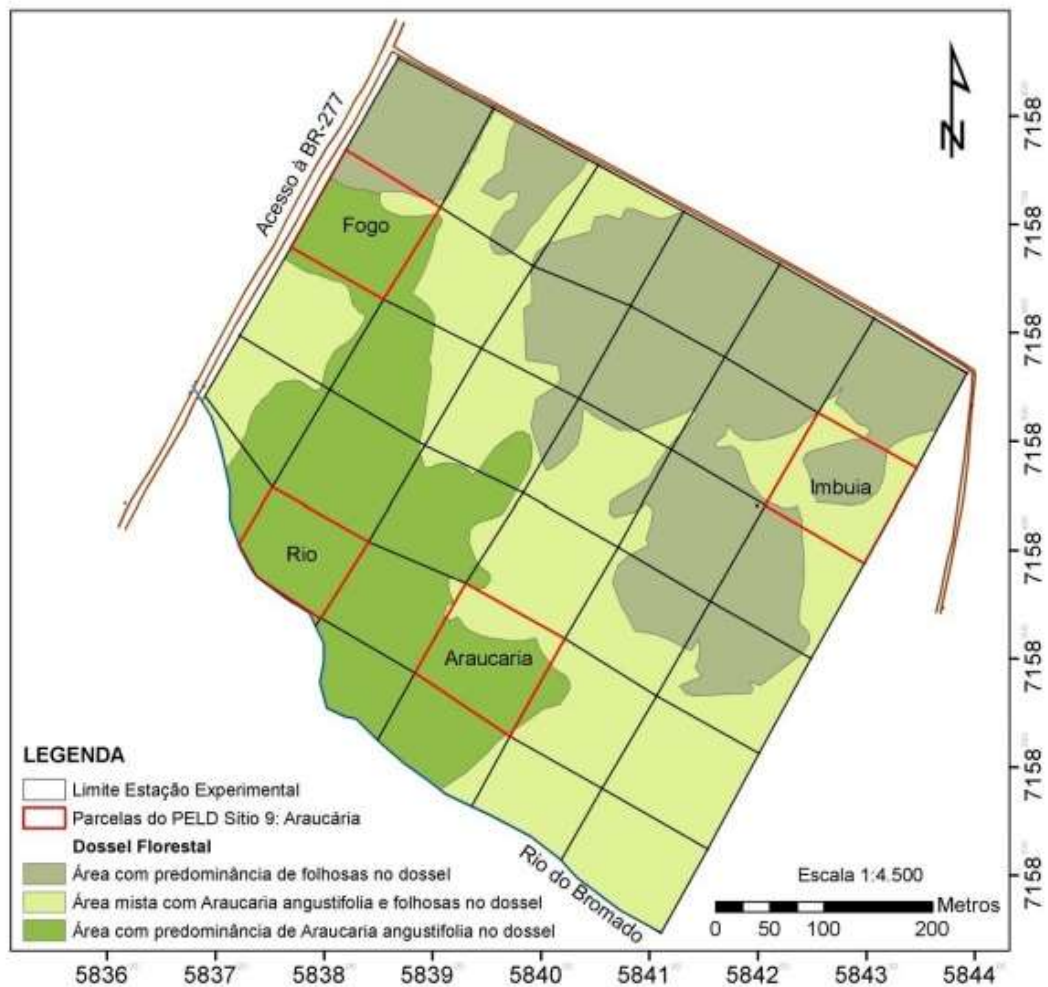


FIGURA 25 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS PERMANENTES EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES DOSSÉIS FLORESTAIS PREDOMINANTES

Fonte: Cassol (2013)

Beneditti et al. (2015) utilizaram o modelo SEBAL (2002) para estimar o índice de área foliar na Floresta Amazônica a partir de imagens Landsat no período de 1984 a 2011. O algoritmo foi considerado satisfatório, evidenciando um desmatamento no local, a partir do decréscimo do IAF.

Giongo et al. (2007) consideram que o modelo SEBAL tem apresentado resultados satisfatórios tanto em cobertura vegetal homogênea ou heterogênea, obtidos em função da variação espacial de parâmetros baseados em funções empíricas.

De acordo com Borges (2008) diversas pesquisas foram realizadas em vários países, para avaliar a consistência e a validade dos dados gerados pelo algoritmo SEBAL. Como por exemplo, trabalhos desenvolvidos na Bacia do Rio do Urso nos Estados Unidos (MORSE et al., 2001), na Turquia (BASTIAANSSEN, 2000), e no Brasil (BEZERRA, 2006; COSTA FILHO, 2005).

Mantelli (2012) utilizou o modelo Duchemin et al. (2006) para estimar o índice de área foliar como suporte à interpretação e geração do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica, utilizando imagens ALOS.

Warren et al. (2014) realizaram a estimativa do índice de área foliar baseado no modelo proposto por Duchemin et al. (2006), no intuito de mapear as áreas agrícolas, e posteriormente identificaram a ocorrência de irrigação nessas áreas, utilizando índices de vegetação.

4.3 CORRELAÇÃO PARA A VARIÁVEL IAF PELOS MÉTODOS TERRESTRE E ORBITAL

Na tabela 8 estão listadas as correlações de Pearson geradas a partir do índice de área foliar estimado através do equipamento imageador CI-110, dos índices de vegetação e o IAF gerado pela imagem Pléiades. O índice de área foliar gerado pelo método orbital foi definido pelo modelo utilizado, sendo denominados como IAF_{SEBAL} e $IAF_{DUCHEMIN}$.

TABELA 8 – ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR DO IAF CI-110 COM OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E IAF ORBITAL

Variáveis	Área total	Parcelas			
		Araucária	Fogo	Imbuia	Rio
IAF _{CI-110} com NDVI	0,32	-0,22	0,09	-0,04	-0,05
*IAF_{CI-110} com EVI	0,76	0,72	0,77	0,54	0,77
*IAF_{CI-110} com SAVI	0,78	0,72	0,78	0,55	0,76
IAF _{CI-110} com SR	-0,03	0,28	-0,02	0,04	0,42
*IAF_{CI-110} com IAF_{SEBAL}	0,66	0,65	0,60	0,60	0,72
IAF _{CI-110} com IAF _{DUCHEMIN}	0,23	-0,17	0,09	-0,07	-0,09

Onde: *Representa as variáveis que apresentaram melhor correlação linear

Fonte: Autora

Os índices de vegetação SAVI e EVI apresentaram resultados muito semelhantes, além do que, foram os índices que apresentaram uma maior correlação com o índice de área foliar obtido a partir da detecção terrestre. O EVI apresentou r variando de 0,54 a 0,77, e o SAVI apresentou r entre 0,55 e 0,78.

Além disso, constatou-se que a parcela Imbuia foi a única que apresentou r abaixo de 0,72 para os índices SAVI e EVI, contrastando com as demais. Conforme citado anteriormente, essa parcela apresentou o menor valor médio do IAF obtido através do método terrestre, possivelmente por apresentar um menor número de indivíduos. Logo, a baixa correlação também pode estar atrelada ao grande porte dos indivíduos, apresentando várias camadas de folhas dispostas ao longo dos níveis verticais do dossel, o que não pode ser estimado de forma acurada pelos sensores orbitais. Turner et al. (1999), ao correlacionar o índice de área foliar com índices de vegetação em um povoamento antigo de coníferas, com indivíduos de grande porte, identificaram que o r diminuía devido à baixa reflectância do infravermelho associada às lacunas do dossel, que causam sombreamento no momento de aquisição da imagem.

O NDVI e o SR apresentaram uma grande variabilidade, não apresentando um padrão entre as parcelas. O NDVI apresentou r de -0,04 a 0,32, e o SR retratou valores entre -0,02 a 0,42. Logo, percebe-se que esses índices apresentaram uma correlação fraca com o índice de área foliar estimado através

do equipamento CI-110, desse modo, sendo desconsiderados na geração dos modelos de regressão.

As correlações obtidas entre o IAF medido em campo e os índices de vegetação SAVI e EVI foram fortes e positivas, o que permite a geração de modelos para predição do índice de área foliar, com razoável qualidade de ajustamento. Ressalta-se ainda, que os modelos gerados têm aplicabilidade local, devido às condições edafoclimáticas e do tipo de cobertura vegetal.

Turner et al. (1999), analisaram a relação existente entre os índices de vegetação SAVI, NDVI e SR com o índice de área foliar em diferentes tipos de vegetação (pastagem, vegetação rasteira e floresta de coníferas). O NDVI só foi capaz de apresentar correlação com o IAF até 5,0, o SR foi considerado como altamente variável quando o IAF ultrapassava 4,0, e o SAVI teve uma forte relação linear ao longo de todos os valores de IAF, chegando a apresentar um r de 0,94. Os autores consideram ainda, que a correlação existente entre o índice de área foliar e os índices de vegetação está diretamente relacionado ao padrão da vegetação analisada e as características do sensor.

Resultados obtidos por Turner et al. (1999) assemelham-se ao apresentado neste estudo, pois os índices NDVI e SR apresentaram correlação linear fraca com o IAF, e o SAVI apresentou alta correlação. Os autores destacam que existe uma melhora significativa no valor do r quando se realiza o processamento digital da imagem, a partir da correção atmosférica da reflectância no topo da atmosfera (TOA). Dessa forma, a alta correlação entre o IAF obtido a campo e o estimado pela imagem Pléiades também pode ser atribuído a correção atmosférica realizada.

Ressalta-se ainda, que a alta correlação encontrada entre as variáveis obtidas a campo e espectrais pode estar associada a escala de observação, tendo em vista que foram utilizadas imagens orbitais de altíssima resolução, uma vez que, alterada a escala, conseqüentemente os dados também sofrerão alterações. Peterson et al. (1988), consideram que sensores com maior resolução espacial ou resolução espectral possuem um maior potencial para estimar o índice de área foliar de forma precisa para todos os tipos de cobertura vegetal.

Dentre os modelos de estimativa do índice de área foliar, o SEBAL apresentou resultados satisfatórios, com r variando de 0,60 a 0,72, apresentando uma forte correlação com os dados de IAF obtidos a campo. O modelo proposto por Duchemin et al. (2006), apresentou correlação linear variando de -0,07 a 0,23, sendo considerado inadequado para caracterizar o IAF da Floresta Ombrófila Mista.

A literatura apresenta poucos estudos envolvendo a relação entre o IAF e os índices de vegetação, principalmente no que se refere a florestas e espécies arbóreas. Alguns estudos envolvendo culturas já apresentaram essa relação, como no caso da produtividade de cana-de-açúcar estimada pelo sensor MODIS (PICOLI et al., 2009); índice de área foliar do trigo (*Triticum aestivum* L.) sob estresse hídrico (OVIEDO e RUDORFF, 2000).

4.4 GERAÇÃO DE MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO IAF

Devido a correlação existente entre o IAF_{CI-110} e os índices de vegetação, foram ajustadas equações de regressão para estimar o índice de área foliar, baseadas nos índices de vegetação EVI e SAVI, conforme a Tabela 9.

TABELA 9 – EQUAÇÕES AJUSTADAS, COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS PARA A ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR A PARTIR DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO SAVI E EVI

N	Equações de regressão	R ²	S _{yx} (%)
1	$IAF_{CI-110} = 5,02 + 3,77 * (EVI)$	0,65	4,11
2	$IAF_{CI-110} = 8,35 + 2,03 * \ln(EVI)$	0,67	4,01
3	$IAF_{CI-110} = 6,08 + 3,20 * (EVI)^2$	0,61	4,38
4	$IAF_{CI-110} = 4,34 + 5,63 * (SAVI)$	0,65	4,10
5	$IAF_{CI-110} = 8,03 - 1,79 * \ln(SAVI)$	0,64	4,19
6	$IAF_{CI-110} = 5,72 + 5,61 * (SAVI)^2$	0,63	4,25

R² = Coeficiente de determinação múltipla; S_{yx}(%) = Erro padrão da estimativa em percentual; ln = logaritmo neperiano; SAVI = Valor do índice de vegetação ajustado para o solo; EVI = Valor do índice de realce da vegetação.

Na figura 26 é possível visualizar a distribuição gráfica dos valores de IAF obtidos a campo com o equipamento CI-110 e do valor estimado através das equações ajustadas utilizando os índices de vegetação.

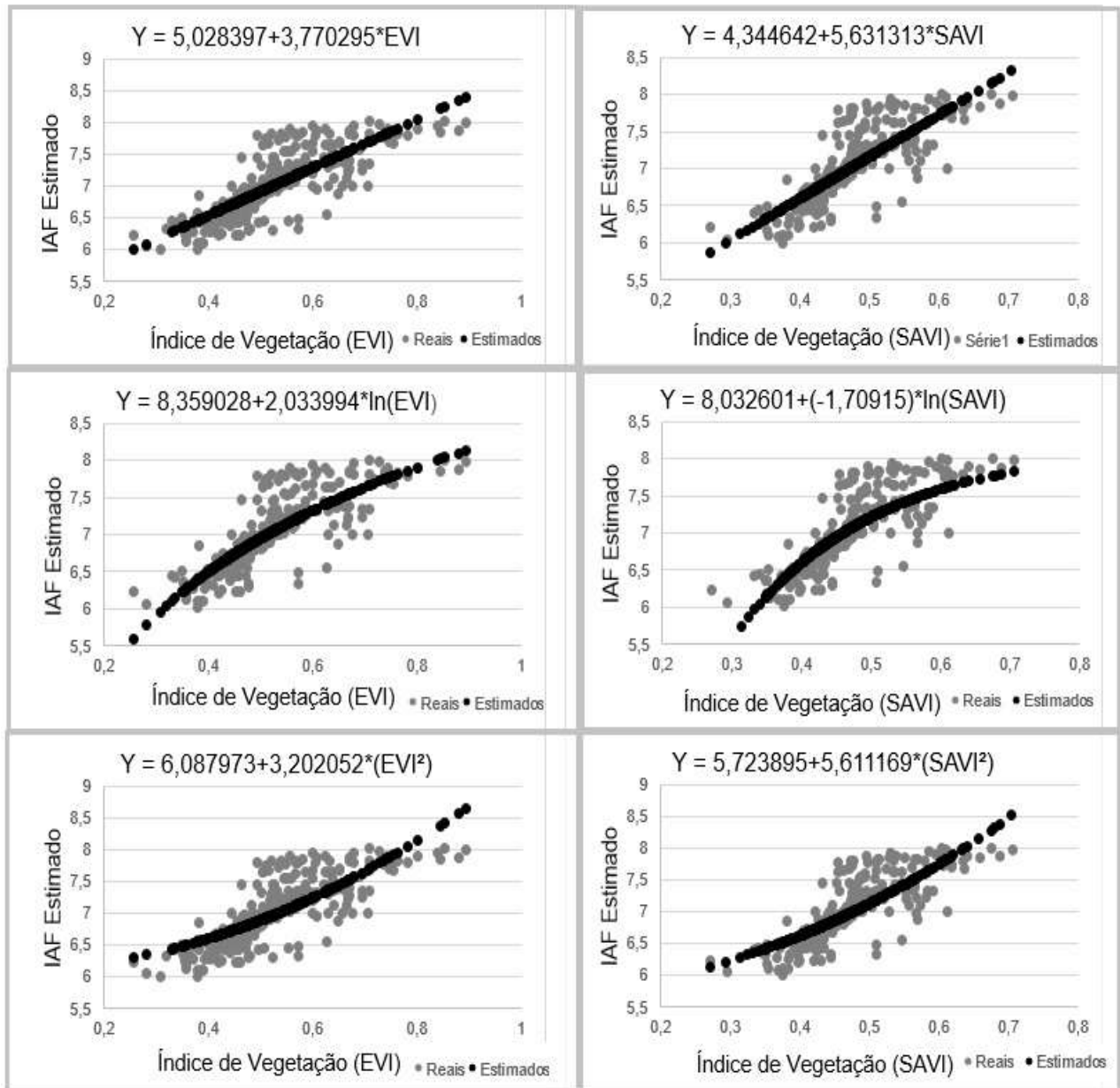


FIGURA 26 – DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE IAF OBTIDO A CAMPO E DE MODELOS AJUSTADOS BASEADOS EM ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

O coeficiente de determinação múltipla (R^2) considera o número de variáveis explicatórias em relação ao número de observações, espera-se que seu valor seja o mais próximo de 1. O erro padrão da estimativa em percentual ($S_{yx}\%$) indica o quão próximo em média os valores estimados estão de seus

próprios valores observados, ou vice-versa. Quanto mais baixo em porcentagem o erro padrão da estimativa, melhor a precisão.

Os valores do R^2 para as equações utilizando tanto o SAVI quanto o EVI apresentaram valores muito próximos, variando de 0,63 a 0,67. O erro padrão da estimativa também apresentou valores próximos para o SAVI e o EVI, o qual foi considerado como baixo, tendo em vista uma variação de 4,01 a 4,38. O EVI e o SAVI apresentaram desempenhos semelhantes, o que já era esperado em função das características iniciais desses índices, bem como média, desvio padrão, amplitude, que já eram muito próximos.

Todas as equações ajustadas foram consideradas satisfatórias, pois, apresentaram coeficiente de determinação múltipla ajustado a partir 0,6 e o erro padrão da estimativa foi abaixo de 5%. As equações que apresentaram o melhor desempenho foram a 2 e a 4, por apresentarem maior valor de R^2 e menor valor de S_{yx} (%).

Almeida et al. (2015), ajustaram modelos de regressão entre o Índice de Área Foliar (IAF) de plantios de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* e índices de vegetação de imagens TM - Landsat 5. Os modelos testados apresentaram R^2 variando de 0,62 a 0,73. O modelo utilizando o SAVI foi o que apresentou maior coeficiente de correlação, porém, foi o que apresentou o maior erro quadrado médio da raiz (EQMR). O modelo que apresentou melhores resultados foi o que utilizou o índice de vegetação SR.

Os valores dos índices de vegetação variaram em função dos valores do IAF, de modo que, obteve-se uma relação sempre positiva entre o IAF e os índices de vegetação, comprovada pelos valores do R^2 . Logo, o valor do coeficiente de determinação múltipla encontrado por Almeida et al. (2015) assemelha-se ao apresentado neste estudo, porém o índice de vegetação de melhor desempenho apresentado para *Eucalyptus* difere do gerado para Floresta Ombrófila Mista.

A análise dos resíduos também foi utilizada como critério de análise do ajuste dos modelos testados, conforme representa a figura 27.

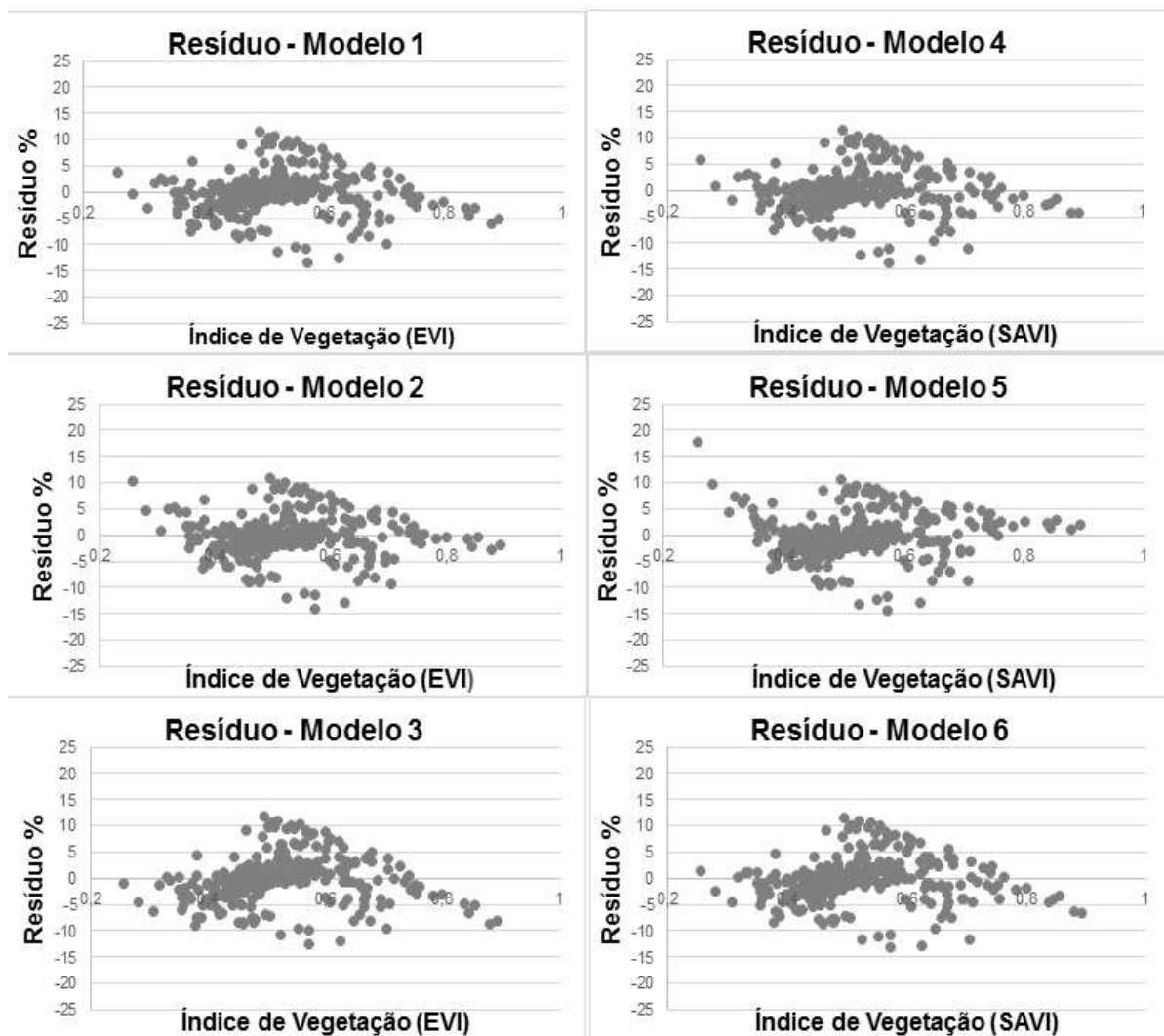


FIGURA 27 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS DOS MODELOS TESTADOS

A análise gráfica dos resíduos representa se há comportamento tendencioso de subestimativa ou superestimativa ao longo da linha de regressão de um determinado modelo matemático. O coeficiente de determinação não reflete a dispersão dos valores estimados, assim os melhores resultados do coeficiente de determinação podem mascarar tendências.

A análise dos resíduos não mostrou de forma conclusiva qual foi o melhor modelo testado, possivelmente pela proximidade dos resultados apresentados nos modelos.

5 CONCLUSÕES

As fotografias hemisféricas geradas para estimativa do IAF a partir do método terrestre apresentaram dificuldade no processo de separabilidade espectral, o que inviabilizou a sua interpretação visual e o uso de softwares de processamento digital de imagens. Diante disso, foram utilizados os valores de IAF gerados automaticamente pelo equipamento imageador CI-110. O IAF obtido a campo apresentou uma grande variabilidade, fator que pode estar associado ao grande número de espécies existentes no local, característico de florestas nativas.

A estimativa do índice de área foliar através do método orbital demonstrou o potencial das imagens Pléiades, considerando que a resolução espacial de 2 m permitiu identificar o comportamento espectral da vegetação. Os índices de vegetação NDVI e SR não foram capazes de apresentar a variabilidade das espécies florestais para a estimativa do índice de área foliar, porém, ambos foram capazes de caracterizar a vegetação e seu vigor vegetativo. Os índices SAVI e EVI evidenciaram as principais características da vegetação, sendo capazes de estimar o IAF.

A estimativa do IAF utilizando o método orbital através dos modelos testados (SEBAL e Duchemin) apresentou resultados bastante distintos. O modelo Duchemin não foi capaz de caracterizar o IAF da Floresta Ombrófila Mista, apresentando uma subestimativa em relação aos valores obtidos a campo, e ainda, não apresentou correlação com esse dado. O modelo SEBAL também apresentou uma subestimativa em relação aos valores obtidos com o CI-110, porém, evidenciou uma forte correlação com os dados obtidos a campo. Esses resultados mostraram a capacidade de utilização do modelo SEBAL para estimativa do IAF em Floresta Ombrófila Mista.

Os dados obtidos a partir de sensor óptico terrestre e dados orbitais de alta resolução espacial, para estimativa do IAF, apresentaram forte correlação. Além disso, os modelos de regressão ajustados indicaram forte relação do IAF obtido a campo, com os índices de vegetação SAVI e EVI, de modo que o valor

desses índices varia em função do IAF. Logo, os modelos gerados apresentaram resultados satisfatórios, o que demonstra a aplicabilidade desta metodologia.

6 RECOMENDAÇÃO

Sugere-se para futuros estudos, a avaliação e aplicação de outras metodologias, bem como, o uso de sensores de média e baixa resolução espacial, principalmente no que se refere ao uso de imagens gratuitas, que poderiam ser testadas em larga escala, em áreas experimentais maiores. Logo, sugere-se também testar o uso de veículos aéreos não tripulados, tendo em vista o avanço dessa tecnologia e o potencial desempenho desses sensores em termos de capacidade de resolução espacial, temporal e espectral aliado ao baixo custo.

Além disso, considera-se importante o teste de outros índices de vegetação, e ainda, o acompanhamento da variação do IAF em diferentes estações do ano e períodos climáticos, e ainda, analisar aplicabilidade em diferentes tipologias florestais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L.J.O.; PACHÊCO, A.; COSTA, T.C.C., LOPES, O.F.; OLIVEIRA, M.A.J. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat data. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.6, n.3, p.492-498, 2002.

AHMED, O.S.; FRANKLIN, S.E.; WULDER, M.A.; WHITE, J.C. Characterizing stand-level forest canopy cover and height using Landsat time series, samples of airborne LiDAR, and the Random Forest algorithm. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 101, p.89-101, 2015.

ALMEIDA, T. S.; FONTANA, D. C.; MARTORANO, L.G.; BERGAMASCH, H. Índices de vegetação para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.17-24, 2005.

ALMEIDA, A.Q.; RIBEIRO, A.; DELGADO, R.C.; RODY, Y.P.; OLIVEIRA, A.S.; LEITE, F.P. Índice de área foliar de *Eucalyptus* estimado por índices de vegetação utilizando imagens TM – Landsat 5. **Floresta e Ambiente**, v.22, n.3, p.368-373, 2015.

AMARAL, S.; SOARES, J.V.; ALVES, D.S.; MELLO, E.M.K.; ALMEIDA, S.A.S.; SILVA, O.F.; SILVEIRA, A.M. Relações entre Índice de Área Foliar (LAI), área basal e Índice de Vegetação (NDVI) em relação a diferentes estágios de crescimento secundário na floresta Amazônica em Rondônia. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.485-489, 1996.

ARANOFF, S. Geographic information systems: a management perspective. Ottawa: DL publication, 1989, 249 p.

ASNER, G.P.; ARCHER, S.; HUGHES, R.F.; ANSLEY, R.J.; WESSMAN, C.A. Net changes in regional woody vegetation cover and carbon storage in Texas Drylands, 1937-1999. **Global Change Biology**, v.9, p.316-335, 2003.

ASTRIUM. **Pléiades Imagery User Guide**. Toulouse, 2012. Disponível em: <<http://www.cscrs.itu.edu.tr/assets/downloads/PleiadesUserGuide.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2015.

BAMBI, P. **Variação sazonal do índice da área foliar e sua contribuição na composição da serapilheira e ciclagem de nutrientes na floresta de transição no norte do Mato Grosso**. 111f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio ambiente), Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2007.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p.161-173, 1991.

BARRETO, T.G. **Geoestatística aplicada à modelagem da dinâmica de crescimento e características químicas do solo de um fragmento florestal**. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.

BENEDITTI, C.A.; QUERINO, C.A.S.; BIUDES, M.S.; MACHADO, N.G.; PAVÃO, V.M.; PAVÃO, L.L. Comparação do índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto nos anos de 1984 e 2011 na região central de Rondônia. **Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p.2937-2942, 2015.

BERRA, E. F. **Avaliação e comparação de imagens LISS-III/RESOURCESAT-1 e TM/LANDSAT 5 para estimar volume de madeira de um plantio de Pinus elliottii**. 127 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Meteorologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BEZERRA, B. G. **Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL**. 127f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós - Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2006.

BHANDARI, A.K.; KUMAR, A.; SINGH, G.K. Improved knee transfer function gamma correction based method for contrast and brightness enhancement of satellite image. **AEU – International Journal of Eletronics and Communications**. v. 69, p. 579-589, 2015.

BORGES, V.P. **Aplicação do algoritmo SEBAL e imagens Landsat para estimativa da demanda hídrica do algodoeiro irrigado no oeste da Bahia**. 95 f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Engenharia de Irrigação) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2008.

BREDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.

BRENA, D.A.; SILVA, J.N.M.; SCHNEIDER, P.R. Metodologia para verificação das condicionantes da análise de regressão. **Revista Floresta**, v.9. n.2, p. 25-47, 1978.

BREUNIG, F.M.; GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N. Directional effects on NDVI and LAI retrievlas from MODIS: A case study in Brazil with soybean. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**.v.13, p. 34-42, 2011.

BRIVIO, P.A.; GIARDINO, C.; ZILIOLI, E. Validation of satellite data for quality assurance in lake monitoring aplicattions. **The Science of the Total Environment**, v.268, p.3-18, 2001.

BROVELLI, M.A.; CRESPI, M.; FRATARCANGELI, F.; GIANNONE, F.; REALINI, E. Accuracy assessment of high resolution satellite imagery orientation by leave-one-out method. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.63, p. 427- 440, 2008.

BROWN, R. H., BLASER, R.E., Leaf area index in pasture growth. **Herbage Abstracts**, v.38, n.1, p 1-9, 1968.

BRUSA, A.; BUNKER, D.E. Increasing the precision of canopy closure estimates from hemispherical photography: Blue channel analysis and under-exposure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 195, p.102-107, 2014.

BURROUGH, P. A.; MCDONNEL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. 333p. 2 ed. New York: Oxford University Press, 1998.

BUSSOTI, F., POLLASTRINI, M. Evaluation of leaf features in forest trees: Methods, techniques, obtainable information and limits. **Ecological Indicators**, v.52, p.219-230, 2015.

CARREIRE, M.B. **Estimativas de biomassa, do índice de área foliar e aplicação do sensoriamento remoto no monitoramento no estudo da cobertura vegetal em Áreas de florestas ombrofila aberta e densa na Amazonia**. 203 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais Tropicais), Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2009.

CASSOL, H.L.G.; SALDANHA, D.L.; KUPLICH, T.M. Comparação dos sensores ASTER e TM para a estimativa de biomassa e carbono em uma Floresta Ombrófila Mista. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.3090-3097, 2013.

CASSOL. L.H.G. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista com uso de dados ópticos de sensores remotos**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CASTILLO, E.M.D.; MARTIN, A.G.; ALADRÉN, L.A.L.; LUIS, M. Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo Natural Park (Spain). **Applied Geography**, v.62, p.247-255, 2015.

CENTENO, J.A.S. **Sensoriamento Remoto e processos de imagens digitais**. Editora UFPR, Curitiba, 2009, 234 p.

CESCATTI, A. Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs methodology and comparison with

standard thresholding techniques. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.143, p. 1-12, 2007.

CHAVEZ, J. P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.24, p.459-479, 1988.

CHEN, J.M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. **Canadian Remote Sensing**, v. 22, p. 229–242, 1996.

CHEN, M.; WILLGOOSE, G.R.; SACO, P.M. Investigating the impact of leaf area index temporal variability on soil moisture predictions using remote sensing vegetation data. **Journal of Hidrology**, p.274-284, 2015.

CID, BIO-SCIENCE. Disponível em: <<http://cid-inc.com>>. Acesso em 15 jun. 2015.

CORREA, S.M.B.B. **Probabilidade e Estatística**. 2ª ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.116p.

COSTA FILHO, J. F. **Avaliação dos componentes do balanço de energia e evapotranspiração em uma região semi-árida usando imagens orbitais Landsat 5 TM e Terra-Modis**. 141f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2005.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. 173f. Tese (Doutorado Geociências) - Universidade de Campinas, Campinas, 1992.

CRUZ, M.A.S.; SOUZA, A.M.B.; JESUS, J.S. Avaliação da cobertura vegetal por meio dos índices de vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na bacia do rio Japarutuba-Mirim em Sergipe. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p.1357-1364, 2011.

DALLA LANA, M. **Dinâmica e prognose do crescimento em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista no sul do Paraná**. 190f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DEVRIES, B.; VERBESSELT, J.; KOOISTRA, L.; HEROLD, M. Robust monitoring of small-scale forest disturbances in a tropical montane forest using Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, v.161, p. 107-121, 2015.

DISNEY, M.; LEWIS, P.; SAICH, P. 3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 114–132, 2006.

DUCHEMIN, B.; HADRIA, R.; ERRAKI, S.; BOULET, G.; MAISONGRANDE, P.; CHEHBOUNI, A.; ESCADAFAL, R.; EZZAHAR, J.; HOEDJES, J.C.B.; KHARROU, M.H.; KHABBA, S.; MOUGENOT, B.; OLIOSO, A.; RODRIGUEZ, J.C.; SIMONNEAUX, V. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. **Agricultural Water Management**, v. 79, p.1-27, 2006.

DURIGAN, M.E. **Florística, dinâmica e análise protéica de uma Floresta Ombrófila Mista em São João do Triunfo – PR**.138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

ECKERT, S.; HUSLER, F.; LINIGER, H.; HODEL, E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. **Journal of Arid Environments**, v. 113, p. 16-28, 2015.

EMBRAPA, **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª ed – Brasília: Embrapa SPI, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sensor Pléiades**. Disponível em: <http://sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missao_Pléiades.php>. Acesso em: 05 mai. 2015.

EPIPHANIO, J.C.N.; HUETE, A.R. Dependence of NDVI and SAVI on Sun/Sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.351-360, 1995.

ERUS, G.; LOMÉNIE, N. How to involve structural modeling for cartographic object recognition tasks in high-resolution satellite images. **Pattern Recognition Letters**. v.31, p. 1109-1119, 2010.

GALVANI, E. Estudos climáticos nas escalas inferiores do clima: manguezais da Barra do Rio Ribeira, Iguape, SP. **Mercator**, v.9, p.25-38, 2010.

GALVANI, E.; LIMA, N.G.B. Fotografias hemisféricas em estudos microclimáticos: Referencial teórico-conceitual e aplicações. **Ciência e Natura**, v. 36, p. 215-221, 2014.

GAMON, J.A.; FIELD, C.B.; GOULDEN, M.L.; GRIFFIN, K.L.; HARTLEY, A.E.; JOEL, G.; PENUELAS, J.; VALENTINI, R. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. **Ecology applied**, v. 5, p.28-41, 1995.

GATES, D. M.; BENEDICT, C. M. Convection phenomena from plants in still air. **American Journal of Botany**, v. 50. n. 6. p. 563-573. 1965.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, p. 11-20, 1965.

GATES, D.M. Physical and physiological properties of plants. In: Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry. Washington: **National Academy of Sciences**, p. 164-223, 1970.

GIGLIO, J.N. **Interceptação da chuva em pequena bacia experimental coberta por Floresta Ombrófila Mista**. 195 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

GILABERT, M.A.; PIQUERAS, J.G.; HARO, F.J.G.; MELIÁ, J. A generalized soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing Environment**, v. 82, p. 303–310, 2002.

GIONGO, P. R.; MOURA, G.B.A.; RÊGO, P.L.; MEDEIROS, S.R.R. Índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF estimados com Imagens Landsat 5 – TM. **Anais.. Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão**, 7., 2007.

GITELSON, A.; KAUFMAN, Y.J.; MERZLYAK, M.N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS–MODIS. **Remote Sensing Environment**, v. 58,p. 289–298, 1996.

GLENN, E. P.; HUETE, A. R.; NAGLER, P. L.; NELSON, S. G. Relationship between remotely-sensed vegetation indices and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. **Sensors**, v. 8, p. 2136-60, 2008.

GOEL, N.S.; QI, W. Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and Fpar: a computer simulation. **Remote Sensing Environment**, v.10, p. 309–347, 1994.

GONSAMO, A.; WALTER, J.M.N.; PELLIKKA, P. CIMES: A package of programs for determining canopy geometry and solar radiation regimes through hemispherical photographs. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v.79, p.207-215, 2011.

GOWER, S.T.; KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, fapar and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, p. 29 51, 1999.

GRECCO, E.D.; SILVEIRA, L.F.V.; LIMA, V.L.S.; PEZZOPANE, J.E.M. Estimativa do índice de área foliar e determinação do coeficiente de extinção luminosa da abóbora *Cucurbita moschata* var. *japonesa*. **IDESIA**, v 29, p.37-41, 2011.

GUIMARÃES, M.J.M., FILHO, M.A.C., PEIXOTO, C.P., JUNIOR, F.A.G., OLIVEIRA, V. V. M. Estimation of leaf area index of banana orchards using the method LAI-LUX. **Water Resources and Irrigation**, v.2, n.2, p.71-76, 2013.

GUTMAN, G.; TARPLEY, D.; IGNATOV, A. The enhanced NOAA global land dataset from the Advanced Very High Resolution Radiometer. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 76, n. 7, p. 1141-1156, 1995.

GUYOT, M.; GUYON, D.; RIOM, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v.4, p. 3-18, 1989.

HENTZ, A.M.K.; RUZA, M.S.; CORTE, A.P.D.; SANQUETTA, C.R. Técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa em ambientes florestais. **Enciclopédia Biosfera**, v.10, n.18, p.2822, 2014.

HOMOLOVÁ, L.; MALENOVSKY, Z.; CLEVERS, J.G.P.W.; SANTOS, G.G.; SCHAEPMAN, M.E. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping. **Ecological complexity**, v.15, p.1-16, 2013.

HUETE, A.R.; JACKSON, R.D.; POST, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, v.17, p.37-53, 1985.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing Environment**. v. 25, p. 295–309, 1988.

HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing Environment**, v.83, p. 195–213, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/>>. Acesso em: 15 mai. 2014.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphanyo – São José dos Campos, SP: Parêntese, 598p, 2009.

JI, L.; ZHANG, L.; ROVER, J.; WYLIE, B.K.; CHEN, X. Geoestatal estimation of signal-to-noise ratios for spectral vegetation indices. **ISPRS – Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.96, p.20-27, 2014.

JIANG, Z., HUETE, A.R., DIDAN, K., MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**. v. 112, p. 3833–3845, 2008.

JIANG, Z.; HUETE, A.R. Linearization of NDVI based on its relationship with vegetation fraction. **Photogrammetric Remote Sensing**, v. 76 p. 965–975, 2010.

JOHANSEN, K.; COOPS, N. C.; GERGEL, S.E.; STANGE, Y. Application of high spatial resolution satellite imagery for riparian and forest ecosystem classification. **Remote sensing of Environment**. v.110, p.29-44, 2007.

JONCKHEERE, I., FLECK, S., NACKAERTS, K., MUY, B., COPPIN, P., WEISS, M. BARET, F., Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, 19–35, p.2004.

JONCKHEERE, I., NACKAERTS, K., MUYS, B.; COPPIN, P. Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 132, p. 96 -114, 2005.

JONES, H. G.; VAUGHAN, R. A. **Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques and Applications**. Oxford: Oxford University Press, 2010.

JONGSCHAAP, R.E.E. Run-time calibration of simulation models by integrating remote sensing estimates of leaf area index and canopy nitrogen. **European Journal of Agronomy**. v.24. p. 316-324. 2006.

JORDAN, C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v.20, p. 663–666, 1969.

JUÁREZ, R.I.N.; ROCHA, H.R.; FIGUEIRA, A.M.S.; GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D. An improved estimate of leaf area index based on the histogram analysis of hemispherical photographs. **Agricultural and forest meteorology**. v.49. p. 920-928, 2009.

KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS–MODIS. **Geoscience and Remote Sensing**, v.30, p. 261–270, 1992.

KOKALY, R.F.; ASNER, G.P.; OLLINGER, S.V.; MARTIN, M.E.; WESSMAN, C.A. Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 78–91, 2009.

KOPPEN, W. **Climatologia: con un studio de los climas de la tierra**. México: Fondo de cultura econômica, 1948. 478p.

KORHONEN, L.; KORHONEN, K.T.; RAUTIAINEN, M.; STENBERG, P. Estimation of Forest Canopy Cover: a Comparison of Field Measurement Techniques. **Silva Fennica**, v.40, p.577-588, 2006.

KUMAR, L.; SCHMIDT, K.S.; DURY, S.; SKIDMORE, A.K. **Imaging spectrometry and vegetation science**. v.4, p. 111–155, 2001.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. Ed. Rima. São Carlos. 2004. 531p.

LEVIN, N.; JOHANSEN, K.; HACKER, J.M.; PHINN, S. A new source for high spatial resolution night time images – The EROS-B commercial satellite. **Remote sensing of environment**. v.149, p.1-12, 2014.

LIANG, L.; DI, L.; ZHANG, L.; DENG, M.; QIN, Z.; ZHAO, S.; LIN, H. Estimation of crop LAI using hyperspectral vegetation indices and a hybrid inversion method. **Remote Sensing of Environment**, p.123-134, 2015.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 2a Edition. New York. John Wiley& Sons. 2000. 721p.

LIU, H.Q.; HUETE, A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **Geoscience and Remote Sensing**, v.33, p. 457–465, 1995.

LIU, Z.; WANG, C.; CHEN, J.M.; WANG, X.; JIN, G. Empirical models for tracing seasonal changes in leaf area index in deciduous broadleaf forests by digital hemispherical photography. **Forest Ecology and Management**, v. 351, p. 67-77, 2015.

LÓPEZ, D.H.; GARCÍA, B.F.; PIQUERAS, J.G.; ALCÁZAR, G.P. An approach to the radiometric aerotriangulation of photogrammetric images. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.10, p. 883-893, 2011.

LOPRESTI, M.F.; DI BELLA, C.M.; DEGIOANNI, A.J. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. **Information Proceession in Agriculture**, v. 2, p. 73-84, 2015.

MA, H.; CANÇÃO, J.; WANG, J.; XIAO, Z.; FU, Z. Improvement of spatially continuous forest LAI retrieval by integration of discrete airborne LIDAR and remote sensing multi-angle optical data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.189, p.60-70, 2014.

MA, H.; SONG, J.; WANG, J. Forest canopy and vertical FADV profile inversion from airborne full-waverform LIDAR data based on a radiative transfer model. **Remote Sensing**, v.7, p.1897-1914, 2015.

MANNSCHATZ, T.; PFLUG, B.; BORG, E.; FEGER, K.H.; DIETRICH, P. Uncertainties of LAI estimation from satellite imaging due to atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**, v.153, p.24-39, 2014.

MANTELLI, L.R. **Sensoriamento Remoto como ferramenta para gestão de recursos hídricos: modelagem espaço-temporal de riscos ecológicos em bacia hidrográficas**. 78 f. Tese (doutorado em Ecologia) – Universidade de São Paulo, 2012.

MARCHIORI, J. N. C. **Fitogeografia do Rio Grande do Sul**. Embasamento Florístico. EST Edições: Porto Alegre. 2006. 39p.

MATLOOBI, M. **Light harvesting and photosynthesis by the canopy**. Advances in Photosynthesis - Fundamental Aspects. InTech, 2012.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T.M. **Introdução ao processamento de imagens digitais de sensoriamento remoto**. Ed. UNB, Brasília, 2012, 276 p.

MEYER JUNIOR, W.H. **Composição botânica e análise de interferência de variáveis ambientais de uma comunidade herbácea em sistema silvipastoril natural**. 86 f. Dissertação (mestrado em agronomia). Universidade Estadual do Centro Oeste. Guarapuava – PR, 2014.

MIRANDA NETO, A. **Avaliação do componente arbóreo, da regeneração natural e do banco de sementes de uma floresta restaurada com 40 anos, Viçosa, MG**. 159f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de viçosa, Viçosa, 2011.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 1ª Edição. São José dos Campos. 2001. 250 p.

MORSE, A., ALLEN, R. G., TASUMI, M., KRAMBER, W. J., TREZZA, R.; WRIGHT, J. **Application of the SEBAL Methodology for Estimating Evapotranspiration and Consumptive Use of Water Through Remote Sensing**. Final Report, 220 p, 2001.

MOURA, Y.M.; SHIMABUKURO, Y.E.; SILVA, G.B.S.; FISCH, G.; DIAS, N.W.; GADIOLI, D. Análise comparativa entre índices de vegetação NDVI e EVI e sua relação com o balanço hídrico na Bacia do Una-SP. **Anais... II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul: Recuperação de áreas degradadas, serviços ambientais e sustentabilidade**, Taubaté, Brasil. p.33-40, 2009.

NASCIMENTO, A.R.T.; LONGHI, S.J.; BRENA, D.A. Estrutura e padrões de distribuição espacial de espécies arbóreas em uma amostra de Floresta Ombrófila Mista em Nova Prata, RS. **Ciência Florestal**. v.11, p. 105 – 119, 2001.

NIELSEN, M.M. Remote sensing for urban planning and management: The use of window-independent context segmentation to extract urban features in Stockholm. **Computers, environment and urban systems**. v. 52, p. 1-9, 2015.

NOGUCHI, M.T.G. **Um sistema baseado em regras fuzzy para classificação supervisionada de imagens multiespectrais de alta resolução**. 150 f. Dissertação (mestrado em Informática) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

NORMAN, J.M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. In: R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel (Editors), **Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation**. Chapman and Hall, New York, p. 301-325, 1989.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo, SP: Editora Blucher, 2008. 333p.

OH, J.; LEE, C. Automated bias-compensation of rational polynomial coefficients of high resolution satellite imagery based on topographic maps. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.100, p.14-22, 2015.

OVIEDO, A.F.P.; RUDORFF, B.F.T. Índice de área foliar e resposta espectral da cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) submetida ao estresse hídrico. **Revista Biociências**, v. 6, n.2, p.39-47, 2000.

PAIVA, Y.G., **Estimativa do Índice de Área Foliar por métodos óticos e Sensoriamento Remoto para calibrar modelo Ecofisiológico em plantios de Eucalipto em áreas de relevo ondulado**. 74f. Mestrado em Meteorologia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, MG, 2009.

PEIXOTO, E.L. **Caracterização e perspectivas do parque Estadual do Rio Doce – MG: uma abordagem a partir de imagens de Sensoriamento Remoto e fotografias hemisféricas de dossel**. 105f. Dissertação (mestrado em Análise e modelagem de Sistemas Ambientais), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PÉLLICO NETTO, S.; SANQUETTA, C.R.; LONGHI, S.J. Conservação e manejo sustentável de ecossistemas florestais – Sítio Ecosilvibras. In: TABARELLI, M.; ROCHA, C.F.D.; ROMANOWSKI, H.P.; ROCHA, O.; LACERDA, L.D. **Dez anos do Programa de Pesquisas Ecológicas de longa duração no Brasil: achados, lições e perspectivas**. Recife. Editora Universitária, 2013, 446 p.

PERAGÓN, J.M.; DELGADO, A.; DIAZ, J.A.R.; LATORRE, F.J.P. A GIS-based decision tool for reducing salinization risks in olive orchards. **Agricultural water management**, v.166, p.33-41, 2016.

PETERSON, D.L.; ABER, J.D.; MATSON, P.A.; CARD, D.H.; SWANBERG, N.; WESSMAN, C.; SPANNER, M. Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents. **Remote Sensing of Environment**, v.24, p.85-108, 1988.

PICOLI, M.C.A.; RUDORFF, B.F.T.; RIZZI, GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**. v.68, p. 789-795, 2009.

PINTY, B.; VERSTRAETE, M.M. GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites. **Vegetation**, v.101, p. 15–20, 1992.

PIZZATO, W. **Avaliação biométrica da estrutura e da dinâmica de uma Floresta Ombrófila Mista em São João do Triunfo – PR, 1995 a 1998**. 186f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

POLI, D.; REMONDINO, F.; ANGIULI, E.; AGUGIARO, G. Radiometric and geometric evaluation of GeoEye-1, WorldView-2 and Pléiades 1-A stereo images for 3D information extraction. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 100. p. 35-47, 2015.

POLONIO, V.D. **Índices de vegetação na mensuração do estoque de carbono em áreas com cana-de-açúcar**. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2015.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2ed. São Paulo. Oficina de textos. 2012. 160p.

PONZONI, F.J.; PINTO, C.T.; LAMPARELLI, R.A.C.; JUNIOR, J.Z.; ANTUNES, M.A.H. **Calibração de sensores orbitais**. São Paulo. Oficina de textos, 2015, 96 p.

PROBIO – Projeto de Conservação e Utilização Sustentável Da Diversidade Biológica Brasileira. **Levantamento da Cobertura Vegetal Nativa do Bioma Mata Atlântica**. Relatório Final. 84 p. IESB – IGEO/UFRJ: 2007.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A.R.; KERR, Y.H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing Environment** , v.48, p. 119–126, 1994.

QUEIRÓS, R. J. S., **Estimativa do índice de área foliar em povoamento de Pinheiro Bravo recorrendo a inventário florestal, detecção remota e Sistemas de Informação Geográfica**. 91f. Dissertação (Mestrado em Gestão ambiental e ordenamento do território). Escola Superior Agrária de Ponte de Lima, 2013.

RODERJAN, C.V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y.S.; HATSCHBACH, G.G. As unidades fitogeográficas do estado do Paraná. **Ciência e Meio Ambiente**, v. 24, p.75-92, 2002.

RODRIGUES, E.L.; FERNANDES, D.H.F.; ELMIRO, M.A.T.; FARIA, S.D. Avaliação da cobertura vegetal por meio dos índices de vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na sub-bacia do Vale do Rio Itapeçerica, Alto São Francisco, Minas Gerais. **Anais...** do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p.1472-1479, 2013.

RIBEIRO JUNIOR, J.I. **Análises estatísticas no Excel: guia prático**. Viçosa: Editora UFV, 2013, 311p.

RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Remote Sensing**, v. 43, p. 1541–1552, 1977.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed. Autor, 2000. 220 p.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing Environment**, v.55, p. 95–107, 1996.

ROSENDO, J.S. **Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari-MG, utilizando dados do sensor MODIS**. 125 f. Dissertação (mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, 2005.

ROSS, J.K. **The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands**. W. Junk, The Hague, Netherlands, 391p., 1981.

ROUJEAN, J.L.; BREON, F.M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing Environment**, v. 51, 375–384, 1995.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS-1. **Anais...Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, v. 1 NASA Scientific and Technical Information Office, Washington, D.C. p. 309–317, 1974.

SAID, A.E.; SHANDOUL, H.M.O.; YEKHLEF, Y.Z. Up dating large scale maps using high resolution satellite image. **APCBEE Procedia**, v. 5, p.435-440, 2013.

SANCHES, L.; ANDRADE, N.L.R.; NOGUEIRA, J.S.; BIUDES, M.S.; VOURLITIS, G.L. Índice de área foliar em floresta de transição Amazônia Cerrado em diferentes métodos de estimativa. **Ciência e natureza**, v.30, p.57-69, 2008.

SCHAEFER, M.T.; FARMER, E.; SOTOBERELOV, M.; WOODGATE, W.; JONES, S. **Validation of LAI and Fpar products**. Green Book. 2014.

SCHREIER, G.; DECH, S. High resolution earth observation satellites and services in the next decade a European perspective. **Acta Astronautica**. v.57, p. 520-533, 2005.

SCHULZE, E.D. Plant life forms and their carbon, water and nutrient relations. **Encyclopedia of plant physiology**, v.12, p. 615–676, 1982.

SELLERS, P. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **Remote sensing**, v. 6, n.8, p. 1335–1372, 1985.

SIMÕES, M.P.; CRUZ, C.P.; BELO, A.F.; FERREIRA, L.F.; NEVES, J.P.; CASTRO, M.C. Utilização de fotografia hemisférica na determinação do índice de área foliar de oliveiras jovens (*Olea europaea* L.). **Revista de ciências agrárias**. v. 30, p.527- 534, 2007.

SMSC – **Space Scientific Missions of the French National Space Agency**. Disponível em: <http://smc.cnes.fr/PLÉIADES/GP_organisation.htm>. Acesso em: 07 mai. 2015.

SURFACE ENERGY BALANCE ALGORITHMS FOR LAND (SEBAL). **Advanced Training and Users Manual – Version 1.0**. 2002. Disponível em <ftp://ftp.funceme.br/Cospar_Funceme_2010/CLASS_DAY_04.11.2010/LAB/quixere/quixere/Final%20Sebal%20Manual.pdf>. Acesso em: 20 out. 2014.

SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. **Remote Sensing: the quantitative approach**. McGraw-Hill Internacional Book Co, London, New York, 396p., 1978.

TURNER, D.P.; COHEN, W.B.; KENNEDY, R.E.; FASSNACHT, K.S.; BRIGGS, J.M. Relationships between leaf area index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across three temperate zone site. **Remote Sensing of Environment**, v.70, p.52-68, 1999.

ÜNSALAN, C.; BOYER, K.L. Linearized vegetation indices based on a formal statistical framework. **Geoscience and Remote Sensing**. v. 42, n.7, p. 1575–1585, 2004.

USTIN, J.A.G.; JACQUEMOUD, S.; SCHAEPMAN, M.; ASNER, G.P.; GAMON, J.A.; ZARCO-TEJADA, P. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p. 67–77, 2009.

VALENTE, T.P.; NEGRELLE, R.R.B.; SANQUETTA, C.R. Regeneração de *Araucaria angustifolia* em três fitofisionomias de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Iheringia**, série Botânica, v. 65, n.1, p. 17-24, 2010.

VALÉRIO, A.F.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R. Análise florística e estrutural do componente arbóreo de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista em Clevelândia, sudoeste do Paraná. **Revista acadêmica Ciência Agrária Ambiental**, v.6, p. 239 – 248, 2008.

VAUDOUR, E.; GILLIOT, J.M.; BEL, L.; BRÉCHET, L.; HAMIACHE, J.; HADJAR, D.; LEMONNIER, Y. Uncertainty of soil reflectance retrieval from SPOT and RapidEye multispectral satellite images using a per-pixel bootstrapped empirical line atmospheric correction over an agricultural region. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v.26, p. 217-234, 2014.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 124p.

WARREN, M.S.; TEIXEIRA, A.H.C.; RODRIGUES, L.N.; HENRANDEZ, F.B.T.; Utilização do sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.1, p. 65-82, 2014.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, p. 41-76. 1947.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com Araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

WIDLOWSKI, J.L.; PINTY, B.; GOBRON, N.; VERSTRAETE, M.M.; DINER, D.J.; DAVIS, A.B. Canopy structure parameters derived from multi-angular remote sensing data for terrestrial carbon studies. **Climatic Change**, v. 67 p. 403–415, 2004.

WOODGATE, W., JONES, S.D., SUAREZ, L., HILL, M., ARMSTON, J.D., WILKES, P., BERELOV, M.S., HAYWOOD, A., MELLOR, A.; Understanding the variability in ground-based methods for retrieving canopy openness, gap fraction, and leaf area index in diverse forest systems. **Agricultural and Forests Meteorology**, p.83-95, 2015.

XU, Q.; HOU, Z.; TOKOLA, T.; Relative radiometric correction of multi-temporal ALOS AVNIR-2 data for the estimation of forest attributes. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.68, p.69-78, 2012.

ZANCHI, F.B.; WATERLOO, M.J.; AGUIAR, L.J.G.; RANDOW, C.V.; KRUIJT, B.; CARDOSO, F.L.; MANZI, A.O. Estimativa do índice de área foliar e biomassa em pastagens no estado de Rondônia, Brasil. **Acta Amazonica**. v. 39, p. 335 – 348, 2009.

ZHANG, Y.; CHEN, J.M.; MILLER, J.R. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.133, p. 166-181, 2005.

ZHAO, D.; HUANG, L.; LI, J.; QI, J. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.62, p.25-33, 2007.

ZHAO, D.; YANG, T.; AN, S. Effects of crop residue cover resulting from tillage practices on LAI estimation of wheat canopies using remote sensing. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 14, p.169-177, 2012.